

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2013

Jan Navrátil

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Analýza FV elektrárny**  
**Analysis of Photovoltaic Power Plant**

2013

Jan Navrátil

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Navrátil**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika  
Téma: **Analýza FV elektrárny**  
**Analysis of Photovoltaic Power Plant**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Základní popis problematiky, fotovoltaický článek, FVe
3. Proved'te typové měření FVe v závislosti na zvolených parametrech
4. Vyhodnocení naměřených údajů
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- MIŠÁK, Stanislav. Vybrané typy zdrojů elektrické energie, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- FAJT, Václav. Elektrická měření, Praha, 1987, SNTL
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

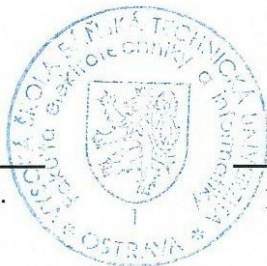
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

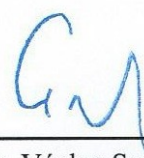
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

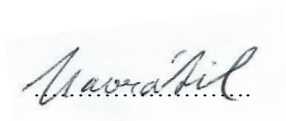


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Čestné prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem také všechny literární prameny, publikace a internetové stránky, ze kterých jsem čerpal.

Datum odevzdání: 7. května 2013

A handwritten signature in black ink, reading "Navrátil", written over a dotted line.

Navrátil Jan

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za rady a doporučení při vypracovávání této bakalářské práce.

Poděkování patří také panu Antonínu Vochtovi za ochotu, umožnění provedení měření a poskytnutí údajů o provozu solární elektrárny v Troubkách.

## **Abstrakt**

### **Analýza FV elektrárny**

Tato práce v teoretické části poukazuje na problematiku solární energetiky, počínaje stručným popisem slunečního záření přes fyzikální podstatu fotovoltaických článků a jejich vývoj, jejich rozdělení podle technologie, konstrukci a výrobu, až po možnosti navýšení elektrické energie a akumulaci solární energie.

Praktická část se zaměřuje na analýzu solární elektrárny v Troubkách o výkonu 500 kW<sub>p</sub>, mezi vyhodnocované veličiny patří účinnost, výkon a výnos elektrárny. Vyhodnocována byla data od roku 2011 po rok 2013.

## **Klíčová slova**

sluneční energie, fotovoltaické články, solární elektrárna Troubky, sluneční záření, akumulace solární energie, účinnost

## **Abstract**

### **Analysis of Photovoltaic Power Plant**

This work in the theoretical section highlights the problem of solar power engineering, beginning with a brief description of solar radiation through the physical fundamentals of photovoltaic cells and their development, their division by technology, construction and manufacture, then options for increasing energy and accumulation of solar energy.

The practical part is focused on analysis of solar power plant in Troubky (500 kW<sub>p</sub>), the evaluated quantities are efficiency, performance and cash yield. Data were evaluated from 2011 to 2013.

## **Keywords**

solar energy, photovoltaic cells, solar power plant Troubky, solar radiation, solar energy storage, efficiency

### Seznam použitých symbolů a zkratek

AM	Air Mass – hmotnost vzduchu
Datalogger	Zařízení pro záznam dat
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
$W_p$	Watt peak – jednotka špičkového výkonu
Z	Činitel znečištění ovzduší
$\varphi$	Úhel dopadu slunečních paprsků [°]
El.	Elektrický

Pokud v tomto seznamu nejsou některé zkratky uvedeny, jsou vysvětleny přímo v textu.

## Obsah:

<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Zdroj energie – Slunce.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Princip funkce FV článku.....</b>	<b>5</b>
2.1 Voltampérová charakteristika článku:.....	7
2.2 Vliv teploty a intenzity slunečního záření na výkon FV článku .....	8
<b>3. Rozdělení fotovoltaických technologií.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Konstrukce fotovoltaických článků .....</b>	<b>12</b>
4.1 Konstrukce a technologie křemíkových FV článků .....	13
4.2 Dělení z hlediska dlouhodobého vývoje .....	14
4.2.1 Články 1. generace .....	14
4.2.2 Články 2. generace .....	15
4.2.3 Články 3. generace .....	15
4.2.4 Články 4. generace .....	15
4.3 Tenkovrstvý modul .....	15
<b>5. Zapojení fotovoltaických systémů .....</b>	<b>17</b>
5.1 Systémy připojené na síť (Grid ON).....	17
5.1.1 Zapojení soustavy pro vlastní spotřebu .....	17
5.1.2 Zapojení soustavy ve výkupním tarifu .....	18
5.2 Systémy ostrovní (Grid OFF).....	18
5.3 Systémy ostrovní, hybridní .....	19
5.4 Systémy hybridní s akumulací .....	19
5.5 Systémy pro kapesní využití .....	20
<b>6. Možnosti navýšení vyráběné energie .....</b>	<b>21</b>
<b>7. Akumulace solární energie .....</b>	<b>25</b>
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>27</b>
<b>8. Provozní analýza FV elektrárny Troubky .....</b>	<b>28</b>
8.1 Parametry elektrárny, informace .....	28
8.2 Měření účinnosti na FV elektrárně Troubky .....	28
8.3 Záznam výkonu na FV elektrárně Troubky .....	33



8.4 Výnos FVE Troubky .....	40
8.5 Úspora CO <sub>2</sub> na FVE Troubky .....	42
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>48</b>

## ÚVOD

Spotřeba energie z fosilních paliv je neúměrná její obnově a vzhledem k neustálému rozvoji nemůžeme dále čerpat a navyšovat výrobu z těchto zdrojů na úkor znečišťování prostředí a jejich neustálému vyčerpávání. Je proto jasné, že využití solární energie spolu s ostatními obnovitelnými zdroji je do budoucna nevyhnutelné.

Tato bakalářská práce bude zaměřena na teorii fotovoltaiky a na analýzu provozu fotovoltaické elektrárny v Troubkách. Práce bude rozdělena do dvou částí, na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části se vyskytne popis zdroje sluneční energie, tedy Slunce. V této kapitole se dočteme, jak sluneční energie vzniká, jak a v jaké formě se dostává k Zemi, kde v rámci ČR je vhodné a naopak nevhodné stavět FV elektrárny. Tato kapitola bude dále obsahovat vysvětlení termínů solární konstanta, činitel znečištění atd. V další kapitole bude přiblížena funkce FV článku a jeho princip. K této kapitole bude také zařazeno vysvětlení fotoelektrického jevu nebo např. vliv teploty a intenzity slunečního záření na výkon FV článku.

V dalších kapitolách teoretické části se také objeví rozdělení FV technologií (články na bázi monokrystalického, polykrystalického a amorfního křemíku), konstrukce FV článků, jejich rozvoj z hlediska dlouhodobého vývoje (články čtyř generací), zapojení FV systémů (Grid ON, Grid OFF a hybridní systémy). V kapitolách Možnosti navýšení energie a akumulace se dočteme, jak co nejefektivněji provozovat FV systémy.

Praktická část se bude věnovat analýze provozu FVE Troubky o špičkovém výkonu 500 kW<sub>p</sub>. V této části se budou vyskytovat všeobecné informace o zmíněné elektrárně, graficky zpracovaná data z dataloggeru systému Fronius Solar Access a měření účinnosti panelů.

Měření účinnosti má ověřit teoretické hodnoty účinnosti a také přiblížit provozovateli této elektrárny princip měření a nahlédnutím do výsledků přispět k rozhodnutí o následné montáži dlouhodobého sledovacího systému pro stanovení účinnosti. K tomuto měření byl použit měřič intenzity slunečního záření a meteostanice. Výkon FV panelu byl odečítán ze střídače.

Další součástí praktické části budou vyhodnocené grafy výkonů za období od ledna roku 2011 do března roku 2013. Z těchto grafů bude možno vyčíst změny např. měsíčních hodnot výkonů s ročním obdobím nebo rozdíl průběhu výkonu za jasného a polojasného dne. Budou zde také graficky vyhodnocovány a srovnávány výkony na jednotlivých střídačích za dané období.

V posledních kapitolách praktické části bude zmíněn výnos FVE Troubky spolu s návratností investic pro výstavbu FVE a také úspory emisí CO<sub>2</sub>.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1. Zdroj energie – Slunce

Sluneční energie vzniká v jeho jádře termonukleární syntézou jader vodíku na jádra hélia. Následně trvá stovky let, než se energie dostane k povrchu a poté je vyzařována formou elektromagnetického záření a nabitých částic, nazývaných jako „sluneční vítr“. Vyzařovaný výkon je poměrně stabilní, mírně kolísá v závislosti na momentální sluneční aktivitě. Výkon, který přenáší sluneční záření je  $P_s \approx 3,91 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Dopadající výkon na povrch Země  $\Delta P_s$  je roven:

$$\Delta P_s = \frac{\pi \cdot r_z^2}{4 \cdot \pi \cdot R_{sz}^2} \cdot P_s \approx 1,79 \cdot 10^{17} \text{ W} \quad (1)$$

Kde střední vzdálenost Země od Slunce  $R_{sz} \approx 1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$  a poloměr Země  $r_z \approx 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ . [2]

Slunce se skládá z:

- Jádra – děj termonukleárních reakcí
- Atmosféry – vznik elektromagnetického záření (fotosféra, chromosféra => koróna)
- Slunečního větru – emitace elektronů, protonů a  $\alpha$  částic [1]

Sluneční záření lze rozdělit na dvě složky:

- Přímé ( $I_p$ )
- Difúzní ( $I_D$ ) – Je to rozptýlené světlo odražené o molekuly plynů a prachu. Jeho intenzita vzrůstá se součinitelem znečištění ( $Z$ ). [1]

*Sluneční konstanta* odpovídá teoretickému množství energie dopadající na jednotkovou plochu mimo atmosféru Země za jednotku času. Její hodnota je přibližně  $I_0 = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . [1]

Část energie pohlcuje atmosféra a část se od ní odráží. Maximální intenzita záření na povrchu Země  $I_{\max} \approx 1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Její hodnotu dále ovlivňují zeměpisná šířka, meteorologické podmínky a denní či roční doba. [2]

Případné zmenšení této intenzity způsobí součinitel znečištění ( $Z$ ), ten závisí na obsahu příměsí a atmosférickém tlaku vzduchu. [2]

Intenzita přímého slunečního záření dopadající na kolmou plochu k paprskům ( $I_{PN}$ ):

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2)$$

Pro plochu o obecné poloze pak platí:

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos \gamma [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (3)$$

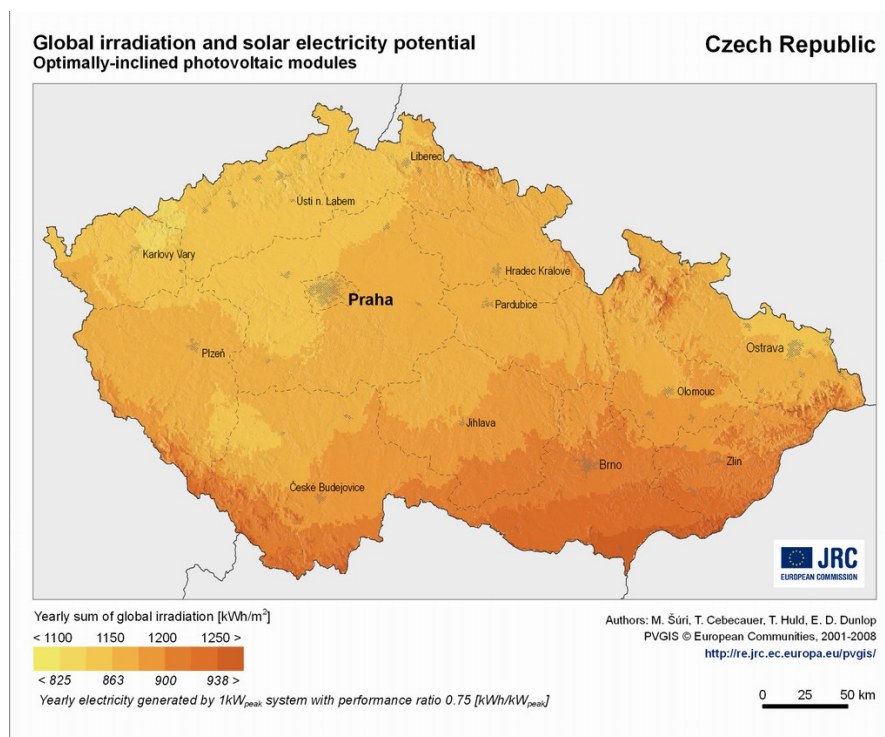
kde  $\gamma$  – úhel dopadu slunečních paprsků [1]

Teoretické množství energie dopadající na plochu závisí na sklonu kolektoru a součiniteli znečištění ( $Z$ ). Úhel pro maximální využití slunečního záření se v průběhu roku v závislosti na období mění od  $30^\circ$  do  $90^\circ$ . [1]

Tab. 1.1: Typické hodnoty součinitele znečištění [1]

Oblast	Součinitel znečištění $Z$
místa nad 2000 m n. m.	2,0
místa nad 1000 m n. m.	2,5
venkov bez znečištění ovzduší průmyslem	3,0
města a průmyslová střediska	4,0
silně znečištěné prostředí	$\geq 5,0$

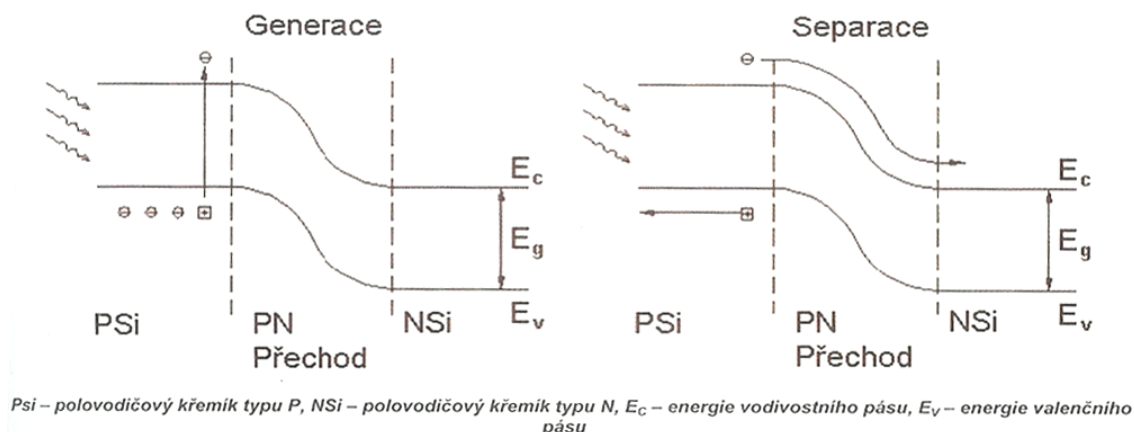
Na Obr. 1.1 je zobrazena sluneční mapa České republiky. Z této mapy je vidět, které oblasti jsou nejvhodnější a naopak nejnevhodnější pro výstavbu FV elektráren. [1]



Obr. 1.1: Sluneční mapa ČR [VII]

## 2. Princip funkce FV článku

Princip funkce FV článku je založen na **fotoelektrickém jevu**. Při tomto jevu jsou vlivem absorpce elektromagnetického záření látkou (je způsobena interakcí světla s částicemi hmoty) uvolňovány elektrony. Princip fotoelektrického jevu je vyobrazen na **Obr. 2.1** a **Obr. 2.2**. [1]



Obr. 2.1: Princip přeměny slunečního záření na elektrickou energii (fotoelektrický jev) [1]

Podstatou je oddělit elektrony a díry a nechat elektrony vydat svoji energii ze slunečního záření při průchodu elektrickým obvodem ve formě užitečné práce. V případě, že se nám to nepovede, elektron se velmi rychle vrátí do díry, která po něm zůstala a svoji energii vydá ve formě tepla, které nevyužijeme. [3]

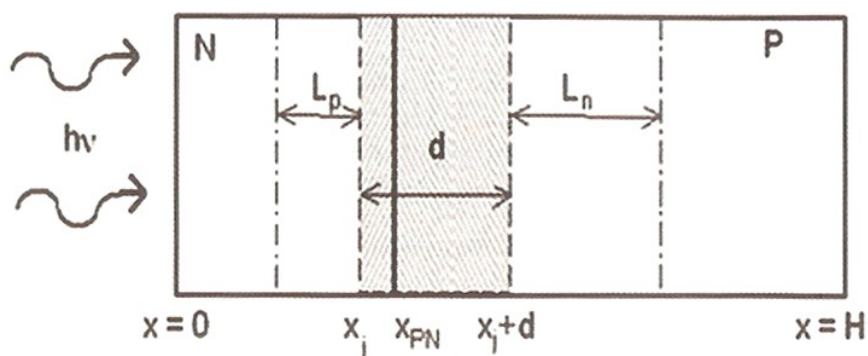
Oddělení elektronů a děr je nejrealizovatelnější v polovodičích, ve kterých se nevyskytují volné elektrony jako ve vodičích, ale vznikají působením tepla nebo slunečního záření. K tomuto oddělení potřebujeme vytvořit PN přechod v polovodiči, který nejčastěji tvoří křemík. [3]

„Tuhý křemík je tvořen mřížkou atomů křemíku, které jsou navzájem spojeny kovalentními vazbami a na rozdíl od kovů se v tomto materiálu žádné volné elektrony, k atomům nevázané, nevyskytují. Kovalentní vazby v křemíku nejsou tak pevné, jako je tomu například u uhlíku ve formě diamantu. K uvolnění elektronů z vazeb stačí u křemíku dodat poměrně malé množství energie, v podstatě jde o to, že křemík má poměrně malou vzdálenost, rozdíl energie, mezi posledním obsazeným (valenčním) orbitalem a prvním neobsazeným. Při pokojové teplotě má proto vždy nějaké malé množství elektronů dostatečnou energii na to, aby se uvolnily z vazeb a dostaly do neobsazeného (vodivostního) pásu. Křemík proto na rozdíl od diamantu vede elektrický proud. Se zvyšováním teploty se křemík stává více vodivým, a to díky tomu, že se do vodivostního pásu dostává více elektronů. Podobná situace nastává i při osvětlení křemíku slunečním zářením.“ [3]

Obsahuje-li křemík příměsí fosforu nebo boru, změní se jeho vodivost, přidání těchto příměsí se nazývá dopování křemíku. V případě dopování fosforem vznikne polovodič typu N (výskyt nadbytečného počtu elektronů), dopováním boru vzniká polovodič typu P (vzniknou nadbytečné díry). Spojením obou polovodičů vznikne v místě dotyku vrstva, nazývaná PN přechod. Vzniká elektrický potenciál, který je následkem rekombinace nábojů. Rekombinace je jev, při kterém elektrony prostupují do části P a díry do části N, to se děje následkem snahy o vyrovnání koncentrace. [3]

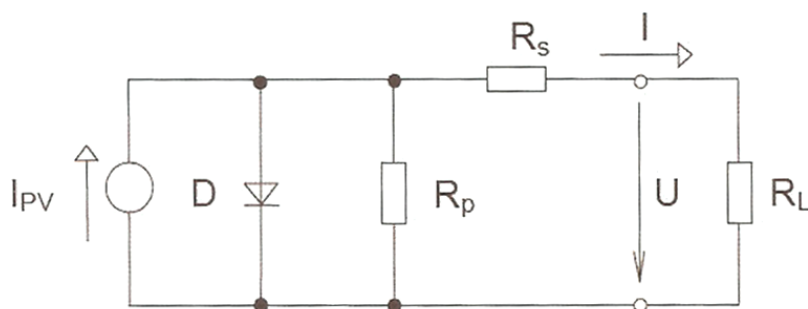
Nejjednodušším příkladem FV článku je velkoplošná dioda s PN přechodem. Aby proběhla fotovoltaická přeměna, musí být splněny následující podmínky:

- polovodič musí pohltit foton,
- foton musí nabudit elektron k přechodu do vyššího vodivostního pásu,
- vznikne dvojice díra a elektron, ta musí být oddělena, aby nedošlo k opětovnému spojení. [1]



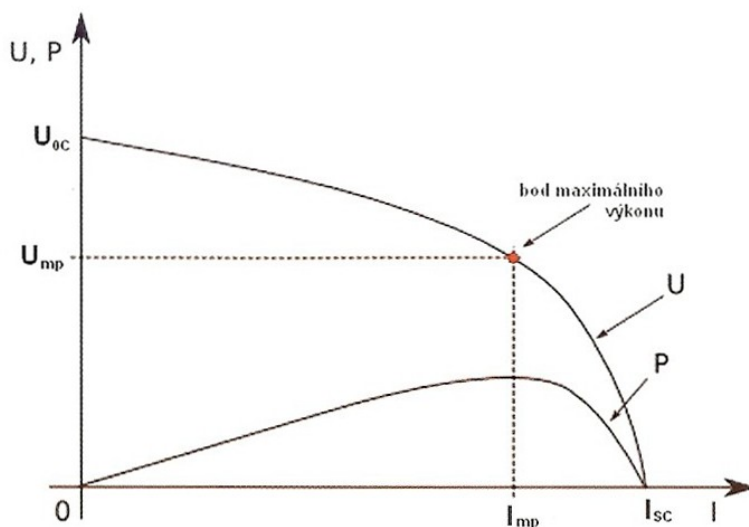
Obr. 2.2: Princip fotoelektrického jevu [VII]

FV článek je také možno namodelovat náhradním obvodem (viz **Obr. 2.3**). Plocha přechodu PN ozářená slunečním zářením vygeneruje proud a přechod se propustně zpolarizuje tím, že se oblast typu N nabije záporně a oblast P kladně. Fiktivní odpory  $R_p$  a  $R_s$  v obvodu pokrývají technologické nedostatky ( $R_p$ ) a odpor materiálů ( $R_s$ ). Diodou D protéká část generovaného proudu zpět. Na diodě je napětí vyšší, než je výstupní napětí  $U$ , o úbytek napětí na odporu  $R_s$ . Odpor  $R_s$  také snižuje výstupní proud a tím i celkovou účinnost článku.



Obr. 2.3 Náhradní obvod FV článku [VII]

## 2.1 Voltampérová charakteristika článku:



Obr. 2.1.1 Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [VII]

výkon (P) solárního článku. Každý z článků má svůj pracovní bod na této charakteristice, ve kterém má největší výkon. Tento bod je označen jako bod maximálního výkonu (MPP) o proudu  $I_{mp}$  a napětí  $U_{mp}$ . Tedy platí:

$$MPP = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (4)$$

Jako podíl výkonu (MPP) a maximálního výkonu, při kterém napětí s proudem dosahují maximálních hodnot, definujeme činitel plnění (FF – Fill Factor).

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{0C} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

Účinnost definujeme jako podíl výkonu (MPP) a výkonu odpovídajícímu množství dopadajícího slunečního záření ( $P_{in}$ ). [1]

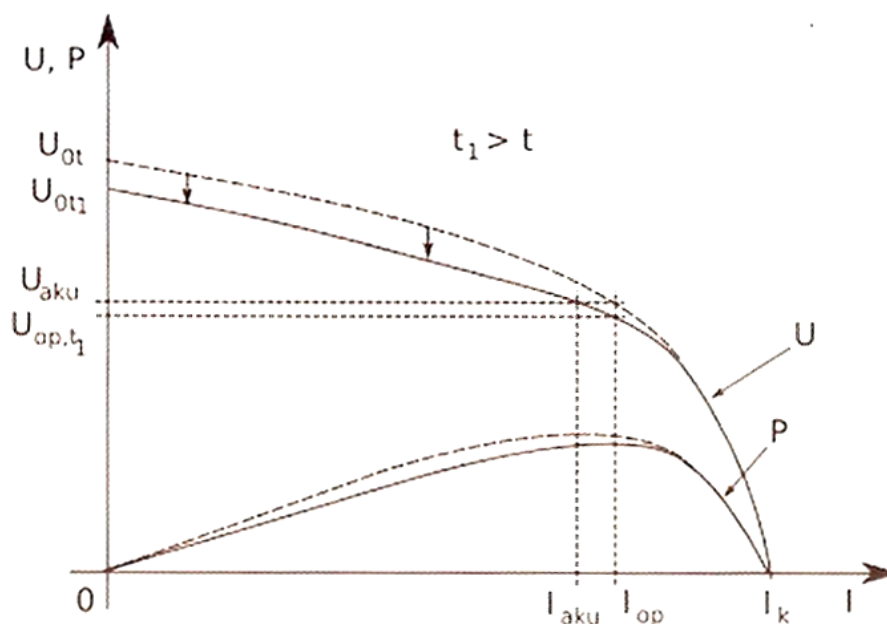
$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (6)$$

„Výše uvedené charakteristické ukazatele jsou vždy určovány za standardních podmínek, tj. při standardní testovací teplotě  $STC = 25^{\circ}C$ , intenzitě slunečního záření  $I = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a definované vzduchové hmotě (Air Mass)  $AM = 1,5$ . Na průběh voltampérové charakteristiky má vliv především hodnota intenzity slunečního záření a teplota.“ [1]



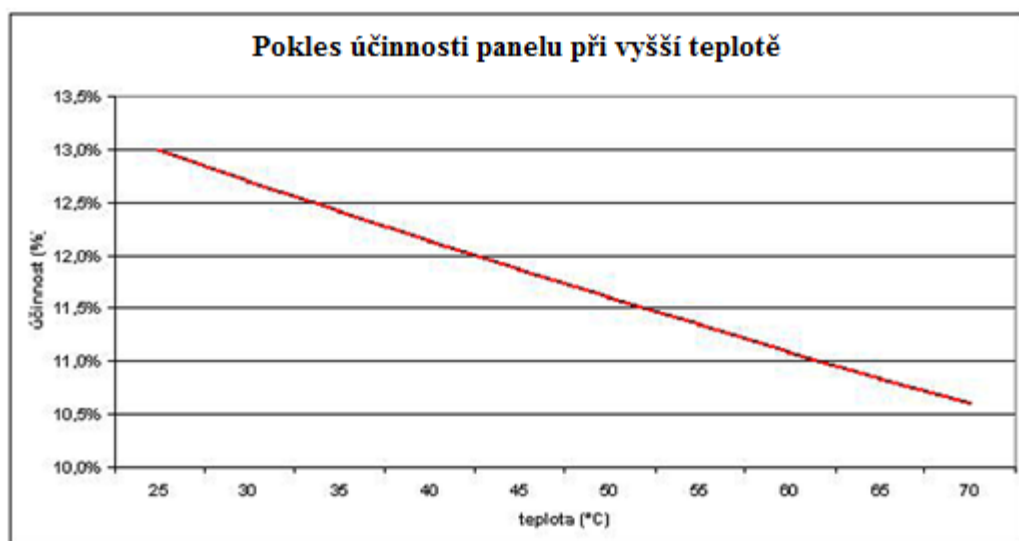
## 2.2 Vliv teploty a intenzity slunečního záření na výkon FV článku

Se zvyšující se **teplotou** vzroste difúzní hodnota minoritních nosičů náboje a zmenší se energetická mezera polovodiče, tím vzroste hodnota tzv. *fotoproudu* a poklesne napětí naprázdno ( $U_{0C}$ ). Teplota povrchu článku může při špatném chlazení článku (bezvětrí) a při jasném počasí, kdy je článek delší dobu vystaven sluneční intenzitě, dosahovat až  $80^{\circ}\text{C}$ , a to při vnější teplotě  $40^{\circ}\text{C}$ . Při takových podmínkách se mění elektrické vlastnosti článku a dojde ke snížení optimálního napětí ( $U_{0t}$ ), a tím poklesne dodávaný výkon. [1]



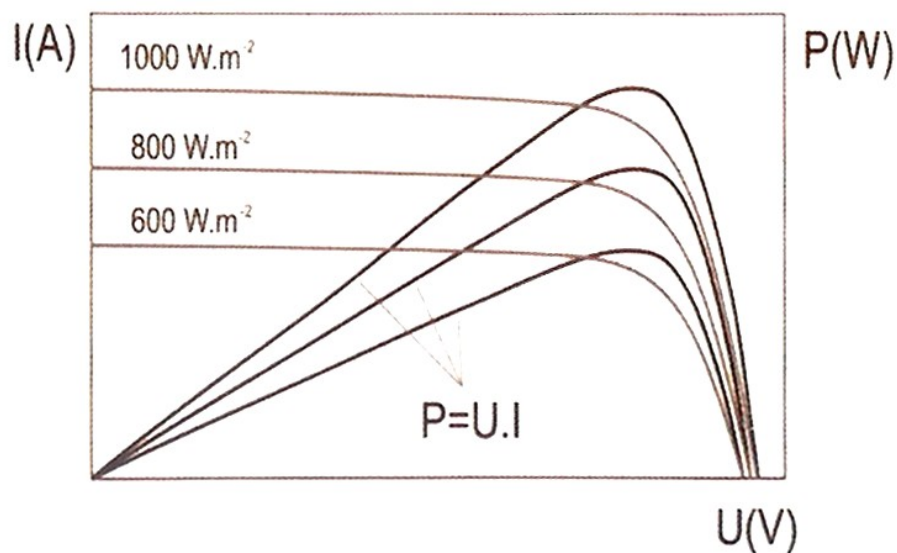
Obr. 2.2.1: Vliv teploty na výkon FV článku [VII]

„U panelů s články z monokrystalického a polykrystalického křemíku se s rostoucí teplotou panelů zhoršuje jejich účinnost. U panelů z amorfního křemíku je pokles účinnosti s teplotou méně výrazný. Ve všech sledovaných FVE byly použity panely s články z monokrystalického křemíku. Lze vysledovat trend nižší produkce u panelů umístěných na fasádě oproti panelům s dobře ochlazenou zadní stranou. Tento trend potvrzuje výše uvedený předpoklad poklesu produkce při vyšší teplotě. Jiný trend ukazuje nižší účinnost panelů v zimních měsících, což ukazuje na skutečnost, že použité monokrystalické panely lépe zpracovávají přímé záření nežli difúzní, které v zimních měsících převažuje.“ [4]



Obr. 2.2.2: Vliv teploty na účinnost FV článku [VIII]

Účinnost FV článků ovlivňuje také **intenzita dopadajícího záření**, viz **Obr. 2.2.3**, s ní také velikost sériového odporu ( $R_s$ ) a paralelního odporu ( $R_p$ ). Při malé hodnotě sériového odporu  $R_s$  účinnost článku s rostoucí intenzitou slunečního záření roste, dosahuje maxima a až při velkých intenzitách začne klesat. U zejména tenkovrstvých FV článků je hodnota  $R_s$  velká, zde s rostoucí hodnotou intenzity slunečního záření účinnost klesá. [1]



Obr. 2.2.3: Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [VII]

### 3. Rozdělení fotovoltaických technologií

*„Nejvíce rozšířené fotovoltaické solární panely v současné době jsou křemíkové. Různým zpracováním křemíku lze vyrobit monokrystalické, polykrystalické a amorfni fotovoltaické články. Monokrystalická buňka má tvar černého osmiúhelníku a polykrystalická buňka je zbarvena modře ve tvaru čtverce. V praxi se používají převážně monokrystalické panely.“ [5]*

**Monokrystalický křemík:** *„Rozměr krystalů v řádu 10 cm (neznámá to, že by muselo jít o jeden neporušený krystal). Vyrábí se z ingotů polykrystalického křemíku zpravidla Czochralského metodou, tj. pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny velmi čistého křemíku. Ingoty monokrystalického křemíku se rozřezou speciální drátovou pilou (větší množství paralelně napnutých drátů s pomocí vhodného abraziva řeže najednou) na tenké plátky (silné přibližně 0,25 až 0,35 mm a v poslední době lze vyrábět i články o tloušťce 0,1 mm). Souběžně s poklesem tloušťky destiček se podařilo i zmenšit odpad při řezání. Plátky (wafers) se zarovnají na rovnoměrnou tloušťku, vyleští se a na povrchu odleptají, aby se odstranily nepravidelnosti a nečistoty. Polovodičový PN přechod se na destičkách vytvoří přidávkou fosforu, který utvoří na povrchu vrstvu s vodivostí typu N.“ [6]*

*„Z výše popsaného postupu je vidět, že je to poměrně energeticky i technicky náročná technologie, a není divu, že se intenzivně hledaly cesty, jak ji zlevnit. Jednou z možností je rovnou táhnout z taveniny tenký monokrystalický pásek, který se pak dá rozřezat na solární články mnohem snadněji a ze stejného množství křemíku se dá vyrobit dvojnásobná plocha fotovoltaických článků. Účinnost tohoto typu článků je však o něco nižší než u článků vyrobených nařezáním z velkých ingotů monokrystalického křemíku.“ [6]*

**Polykrystalické články:** *„Tyto články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do vhodných forem a řezáním vhodných ingotů na tenké plátky. Odlévání je podstatně jednodušší metoda než tažení monokrystalu a lze také připravit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Takto vyrobené články mají trochu horší elektrické vlastnosti (nižší proud a účinnost), protože na styku jednotlivých krystalových zrn (jejich rozměry jsou v řádu milimetrů) je větší odpor. Zásadní výhodou je to, že výchozí surovina je levnější a lze je vyrábět ve větších rozměrech. Tento typ článků má zajímavý vzhled; viditelné hranice krystalů připomínají leštěný kámen.“ [6]*

**Amorfni křemík:** Tento typ zpracování křemíku se ke komerčním účelům využívá přibližně od roku 1985. Tuto technologii můžeme nejčastěji vidět v kalkulačkách a zařízeních, které nejsou energeticky náročné. Amorfni látky jsou látky, které nemají v pevném skupenství pravidelnou strukturu (krystalickou mřížku). [7]

Zásadním rozdílem od ostatních typů článku je jejich výroba. Krystalický křemík se vyrábí ve vysokých pecích, vznikají ingoty křemíku, které jsou následně řezány na tloušťku cca 0,3 mm a využívány jako články. U amorfniho křemíku výroba spočívá v tom, že se ve vakuové komoře při teplotách cca 200°C napařováním nanáší na skleněnou tabuli,

plast nebo jiný podklad, vrstva (ne větší než 1  $\mu\text{m}$ ) amorfního křemíku. Odtud pochází označení „tenkovrstvá technologie“. Z toho vyplývá, že tento typ výroby amorfních modulů je méně materiálově, energeticky náročný a je levnější. Avšak oproti krystalickým modulům mají přibližně poloviční účinnost, tzn., že při instalaci je třeba pokrytí dvojnásobné plochy. Další obrovskou výhodou těchto modulů je, že při vysokých letních teplotách tolik netrpí. Amorfni křemík má totiž nižší teplotní součinitel výkonu a jeho účinnost s teplotou klesá pomaleji než u krystalického křemíku, tzn., že v období léta může být výhodnější. Také se liší svým vzhledem, panely z amorfního křemíku lze použít na místech, jako jsou např. CHKO, památkové chráněné zóny atd., což by v případě krystalických článků nebylo povoleno. Další výhodou může také být možnost orientace panelů jinam než na jih, to je v případě této technologie výhodnější. [7]

Druhým nejčastěji používaným materiálem pro výrobu FV článků je **arsenid galia** (GaAs). Vývoj článků na bázi tohoto materiálu je na nižší úrovni než u křemíku. Účinnost článků se pohybuje okolo 20%, což je vyšší účinnost než u křemíkových. Mají ale oproti křemíkovým řadu nevýhod. Jsou podstatně dražší, křehčí a mají zhruba dvojnásobnou měrnou hustotu ( $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), což ale lze vyřešit nanesením nižší vrstvy čipu. Mezi výhody, kromě účinnosti, také patří možnost využití při vyšších teplotách, při nichž se jejich účinnost oproti křemíkovým sníží jen nepatrně. [8]

Dalšími materiály pro FV články jsou **telurid kadmia** (CdTe), popř. **diselenid mědi a india** ( $\text{CuInSe}_2$ ). V současnosti jsou články vyrobené z CdTe z hlediska poměru cena/výkon nejvýhodnější. Jejich účinnost se pohybuje mezi 10 a 11%. Jejich největším problémem je však obsah nebezpečných kovů (kadmia). Z článků se po vyřazení z provozu stane toxický odpad, jehož likvidace se také odrazí v jejich výsledné ceně. [9]

Tenkovrstvé články z diselenidu mědi, jejichž účinnost dosahuje 10-15%. Jejich systém je natolik komplikovaný, že se prozatím nezačaly masově vyrábět a pravděpodobně k tomu ani nedojde z důvodu nedostupnosti india. [9]

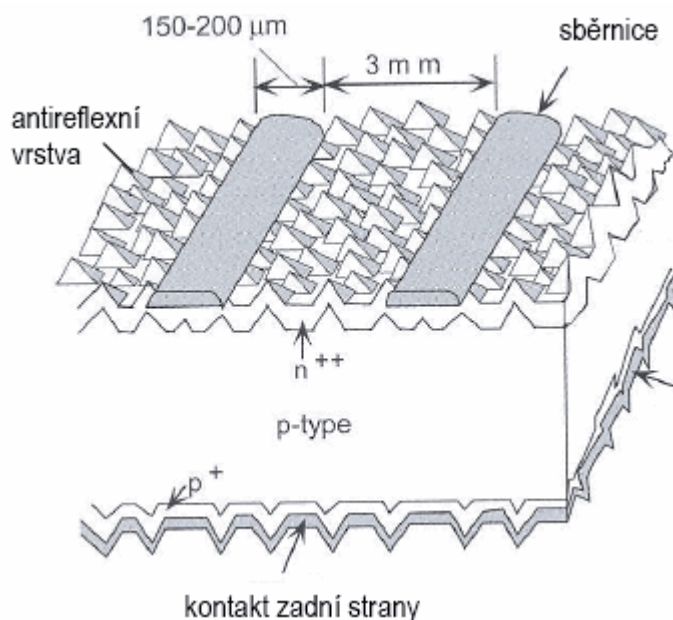
## 4. Konstrukce fotovoltaických článků

Nejběžnějším materiálem používaným pro výrobu FV článků je křemík díky dosahované vysoké účinnosti. Pro výrobu FV článku potřebujeme křemíkové destičky vyrobené z krystalického křemíku. Jeho rozměry jsou obvykle 200x200 mm. Kvůli úsporám na materiálu, a tudíž i snížení výrobní ceny se místo monokrystalického křemíku začaly vyrábět články z multikrystalického křemíku. Nevýhodou multikrystalického křemíku jsou zvyšující se ztráty způsobené rekombinací, které vznikají na hranici krystalických zrn, která jsou náhodně orientována. Účinnost těchto typů článků se téměř srovná s monokrystalickými (u multikrystalických se pohybuje mezi 11 – 14% a u monokrystalických 12 - 16%). [1]

Jeden fotovoltaický článek je vyroben z jedné křemíkové destičky, jeho strukturu můžeme vidět na **Obr. 4.1.** [1]

Velice důležitou součástí článků je ochrana vůči vnějším vlivům prostředí a to kvůli životnosti. Jako ochrana před krupobitím, vlhkostí, větrem se na přední stranu článku připevňuje speciální tvrzené sklo. Požadavek na toto sklo je co nejvyšší propustnost slunečního záření. Neméně důležitou součástí článků je zadní kryt, který je vyroben buď opět ze skla, nebo z několikavrstvé plastové fólie. Dále je nutné celý fotovoltaický modul upevnit na nosnou konstrukci, proto je zde hliníkový rám. Na zadní straně modulů jsou svorkovnice s kabelovými vývody. [1]

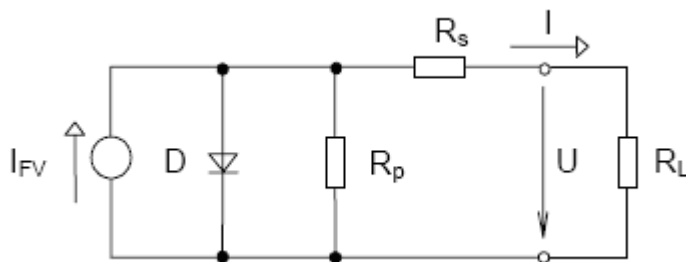
Na celý tento FV modul jsou předepsané optické, elektrické i mechanické vlastnosti.



*Obr. 4.1: Struktura FV článku [VII]*

## 4.1 Konstrukce a technologie křemíkových FV článků

Z náhradního schématu fotovoltaického článku, viz **Obr. 4.1.1**, vyplývá, že pro získání maximálního výkonu článku, musí být co největší získaný proud  $I_{FV}$ , zároveň musíme dosáhnout co nejnižší hodnoty sériového odporu  $R_S$  a naopak co nejvyšší hodnoty svodového odporu  $R_P$ . [10]



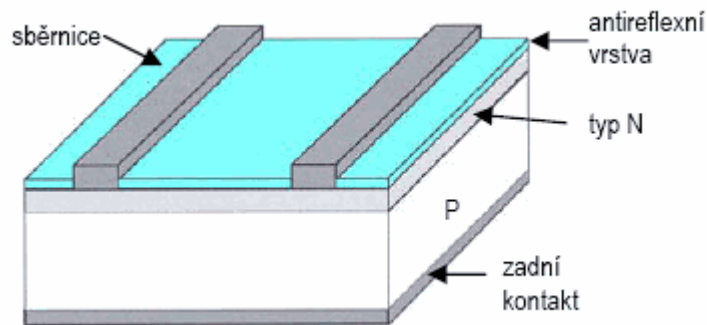
Obr. 4.1.1: Náhradní schéma FV článku [IX]

- Snížení sériového odporu  $R_S$  závisí na omezení elektrických ztrát. Dále také optimalizací sběrnice dosáhneme maximální účinné plochy článku.
- Zvýšení získaného (generovaného) proudu  $I_{FV}$  provedeme zajištěním maximální generace nosičů v objemu článku, následný sběr těchto nosičů pomocí přechodu PN a minimalizací rekombinace v objemu i minimalizací rekombinace povrchu článku. Tímto získáme maximální generovaný proud  $I_{FV}$ . [10]

V neposlední řadě je nutné zajistit finanční dostupnost vyráběných panelů, proto je při výrobě nutné použít takové technologie, aby konečná cena panelů byla co nejnižší při maximální možné účinnosti a zároveň, aby byly spolehlivé. [10]

K tomu přispělo nahrazení vakuově deponovaných kontaktů (realizovány napařováním nebo napařováním), kontakty realizovanými tzv. sítotiskovou metodou, tímto došlo k zjednodušení výroby a výraznému snížení nákladů. [10]

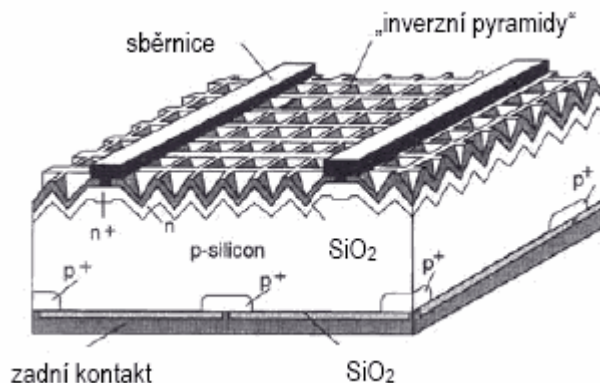
*„Rychlý růst účinnosti článků na počátku padesátých let je spojen s nalezením základních principů konstrukce a technologie článků, tj. optimalizace polohy přechodu PN a zvýšení generace nosičů v objemu FV článku pomocí antireflexní vrstvy. Základní konstrukce FV článků této generace je znázorněna na Obr. 4.1.2.“* [10]



Obr. 4.1.2: Konstrukce článku s rovinným povrchem a antireflexní vrstvou [IX]

„Tato konstrukce byla užívána až do poloviny osmdesátých let. V tomto relativně dlouhém období byla postupně zdokonalována technologie (příprava výchozího materiálu, jednotlivé technologické operace, metody kontaktování, pouzdření do modulů), což se projevilo v postupném zvyšování účinnosti a snižování cen vyráběných článků.“ [10]

V průběhu osmdesátých let proběhl další vývoj, zejména zdokonalení antireflexní vrstvy texturací povrchu. Díky tomuto pokroku bylo u struktury PEARL, viz **Obr. 4.1.3.**, v devadesátých letech dosaženo účinnosti **24%**. Tento článek dosáhl tak vysoké účinnosti díky minimální odrazivosti, které bylo dosaženo antistropním leptáním přes oxidovou masku na výchozím (1,0,0) monokrystalickém křemíku. [10]



Obr. 4.1.3: Struktura PERL s účinností 24% [IX]

## 4.2 Dělení z hlediska dlouhodobého vývoje

### 4.2.1 Články 1. generace

Jde o FV články vyráběné z desek monokrystalického křemíku, tyto desky společně tvoří velkoplošný PN přechod. V současnosti jsou to nejvíce využívané články, a to kvůli relativně vysoké účinnosti (u sériově vyráběných článků se pohybuje okolo 15%,

u laboratorních pak až 25%). Také vysoká životnost a dlouhodobá stabilita výkonu jsou důležité parametry těchto článků. Nevýhodou je velká spotřeba čistého křemíku a složitost výroby. [1;3]

#### 4.2.2 Články 2. generace

U těchto článků ve snaze ušetřit množství čistého křemíku při výrobě, a to nahrazováním jinými prvky, zejména amorfním a polykrytalickým křemíkem s vrstvou až 1000 krát tenčí než u článků 1. generace, dochází ke snížení účinnosti, a to na cca 10%. Snížením tloušťky nanášeného materiálu klesají i náklady na výrobu, zlepšují se mechanické vlastnosti, zejména pružnost. Těchto pozitivních vlastností lze využít např. při použití na nerovných plochách např. střeších, zde článek plní jeho základní úlohu, vyrábí elektřinu a zároveň funguje jako nepropustná fólie. Dále je možno využít tyto pružné články při výrobě oblečení nebo batohů, kde mohou plnit funkci nabíječky mobilního telefonu nebo jiných přenosných zařízení. [1;3]

#### 4.2.3 Články 3. generace

Zde stále probíhá výzkum a zatím se nevyužívají vzhledem k malé stabilitě, nízké účinnosti a životnosti. Použití jiných metod k separaci náboje než použití přechodu PN, sem se řadí např. polymerní nebo fotoelektrochemické (fotogalvanické) články nebo za použití nanostruktur uhlíkové tyčinky a trubičky a kvantové tečky nanesené na podložky. Tyto struktury pak umožňují cíleně ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti, a tím zefektivňovat využití. [1;3]

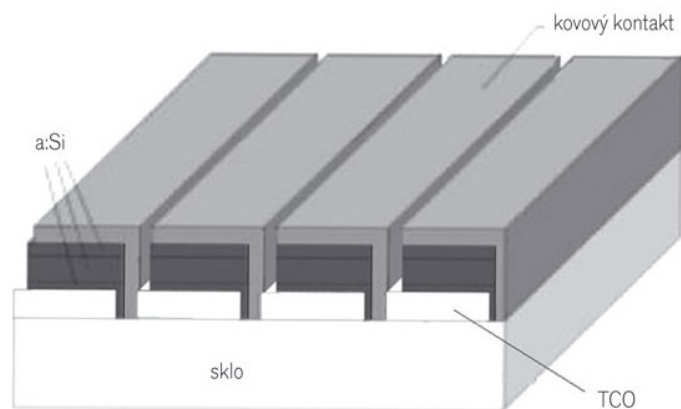
#### 4.2.4 Články 4. generace

Technologie využívající vícevrstvé články, jež dokážou pojmout sluneční záření o různých vlnových délkách a to tak, že každá vrstva je naladěna na různé vlnové délky. V praxi to pak znamená, že světlo o dané vlnové délce při dopadu na vrstvu, která jej nedokáže využít, toto světlo propustí k další vrstvě, která ho díky své vhodné vlnové délce bude schopna využít. [1;3]

### 4.3 Tenkovrstvý modul

Hlavním cílem tenkovrstvých modulů je snížení výrobních nákladů, jejich účinnost se pohybuje mezi 6 - 10%. V tenkovrstvé technologii nejsou realizovány jednotlivé FV články, ale celý modul v sekvenci technologických operací. Obvykle na sklo, které slouží jako nosná podložka, je uložena vrstva transparentního vodivého oxidu (TCO) a laserem se oddělí oblasti článků ve tvaru proužků. Poté se provede tzv. *plasmatická depozice tenkovrstvého článku* a laserem se odstraní struktura článku v proužku, který těsně přiléhá k hranici, kterou vymezuje první laserový řez. Následuje uložení kovového kontaktu, nejčastěji užitím metody naprašováním. Třetí řez laserem odstraňuje proužek kontaktu tak, aby vznikla struktura modulu se sériovým zapojením článků, viz **Obr. 4.3.1**. Na zadní straně modulu je přilaminovaná ochranná vrstva z polymeru nebo skla. [1]





*Obr. 4.3.1: Tenkovrstvý fotovoltaický modul [VII]*

Jejich využití bylo popsáno výše u článků 2. generace. Jejich produkce se zvyšuje a to díky nedostatku křemíku, který se projevil po roce 2006, způsobený rozšířením fotovoltaických zařízení. [1]

## 5. Zapojení fotovoltaických systémů

### 5.1 Systémy připojené na síť (Grid ON)

Instalace tohoto systému přináší výrobu čisté energie, proto se tyto systémy využívají pro výrobu el. energie. Obvykle se skládají z více FV panelů, z měničů napětí, regulací, měřidel a síťové ochrany. Obvykle se instalují na střechách budov nebo na pozemcích průmyslových objektů. Získanou energii je možno buď využít pro vlastní spotřebu a přebytky prodat do distribuční sítě, nebo všechnu vyrobenou energii využít za účelem zisku a prodat ji do distribuční sítě. [1;3]

V případě zapojení pro vlastní spotřebu provozovatel pokryje svou vlastní spotřebu, nemusí ji nakupovat od distributora, prodá přebytek za stanovenou cenu a navíc získá tzv. zelený bonus. [1;3]

Měření spotřebované a vyrobené el. energie se liší dle výkonu soustavy. Pro soustavy do 20 kW<sub>p</sub> se používá přímý 4Q (čtyřkvadrantový) elektroměr. Pro systémy nad 20 kW<sub>p</sub> se používají tyto způsoby měření: a) měření dodávky nepřímo (4Q elektroměrem) na straně nízkého napětí transformátoru (do 600 kVa), b) měření dodávky nepřímo (4Q elektroměrem) na straně vysokého napětí transformátoru (nad 600 kVa), c) samostatné měření spotřeby. Obě Grid ON zapojení můžeme vidět na **Obr. 5.1.1** a **Obr. 5.1.2**. [1;3]

#### 5.1.1 Zapojení soustavy pro vlastní spotřebu



Obr. 5.1.1: Zapojení v zeleném tarifu [I]

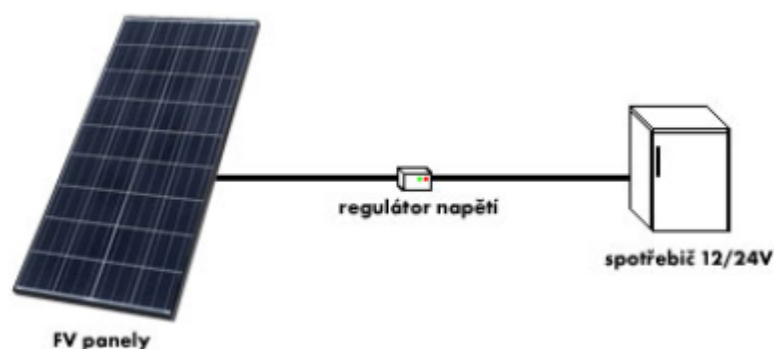
### 5.1.2 Zapojení soustavy ve výkupním tarifu



Obr. 5.1.2: Zapojení soustavy ve výkupním tarifu [I]

### 5.2 Systémy ostrovní (Grid OFF)

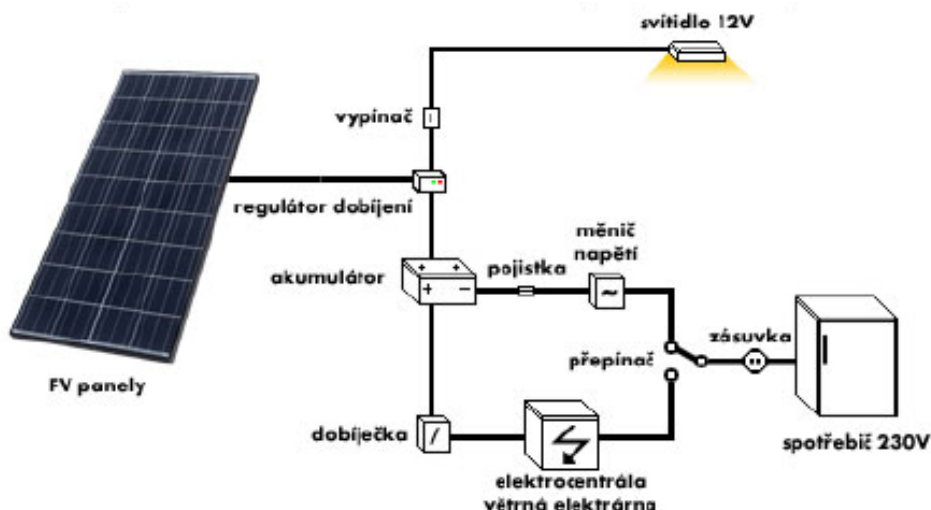
Grid OFF (nebo také autonomní) systémy se používají na místech, kde se lze jen těžko nebo nelze vůbec připojit na distribuční síť. Nejčastěji se používají v odlehlých objektech, jakými jsou např. chaty, přívěsy, zahradní domky nebo jachty. V případě zapojení bez střídače (snížení nákladů) je třeba použít spotřebiče na stejnosměrný proud. Při výstavbě je také nutno brát v úvahu celkový výkon spotřebičů, přičemž se zvyšujícím se výkonem zvyšují nároky na výkon FV panelů a akumulátory. [1;3]



Obr. 5.2.1: Zapojení ostrovního systému s přímým napájením [X]

### 5.3 Systémy ostrovní, hybridní

Jsou kombinací ostrovního (autonomního) systému a systému připojeného na síť. Používají se na místech, kde je zapotřebí udržet trvalý provoz s občasným využitím zařízení s vyšším příkonem. Musí se dimenzovat pro zimní provoz, čímž se zvýší instalovaný výkon systému, a tudíž i náklady. Výhodnější je využít systém, který pokryje potřebu el. energie v obdobích, kdy energie dodávaná z FV systému není dostatečná. Takový systém může být např. větrná elektrárna, kogenerační jednotka atd. [1;3]

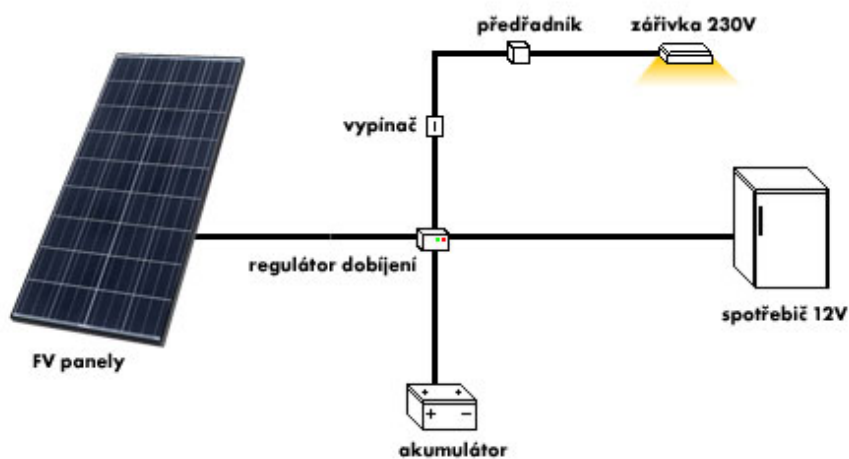


Obr. 5.3.1: Zapojení hybridního systému [X]

### 5.4 Systémy hybridní s akumulací

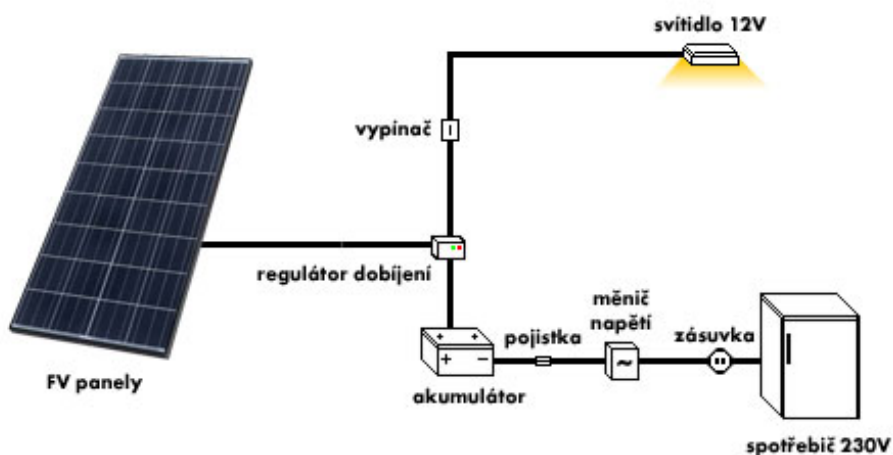
Akumulovat elektrickou energii potřebujeme u ostrovních systémů, kde je zapotřebí čerpat energii i při slabém nebo žádném slunečním záření. Musíme zvolit vhodné akumulátory, jejichž optimální dobíjení a vybíjení je zajišťováno regulátorem dobíjení. K těmto soustavám je možné připojit spotřebiče na stejnosměrný proud nebo spotřebiče vyžadující střídavé napětí 230 V napájené přes napěťový střídač (viz **Obr. 5.4.1** a **5.4.2**). Tyto systémy uplatníme např. jako zdroj pro napájení semaforů, u zahradního osvětlení, u monitorovacích zařízení atd. [1;3]

### Systém s akumulací elektrické energie (12/24V)



Obr. 5.4.1: Zapojení ostrovního systému s akumulací pro spotřebič 12 V [X]

### Systém s akumulací elektrické energie (12V i 230V)



Obr. 5.4.2: Zapojení ostrovního systému s akumulací pro spotřebič 230 V [X]

## 5.5 Systémy pro kapesní využití

Tyto systémy jsou nejčastěji využívány, používají se např. v kalkulačkách, budících, hodinkách a dalších spotřebičích o malých spotřebách. Lze je také využít jako např. kapesní nabíječku mobilního telefonu. [1;3]

## 6. Možnosti navýšení vyráběné energie

Navýšení vyráběné energie lze dosáhnout již při návrhu elektrárny správnou volbou použitých technologií. Lze vycházet z následujícího vzorce pro výpočet účinnosti elektrárny.

$$\eta_{\text{celk.}} = \eta_{\text{panelů}} \cdot \eta_{\text{střídačů}} \cdot \eta_{\text{trafa}} \quad (7)$$

Používají se programy, které určují maximální možný výkon pro danou lokalitu, kde se bude elektrárna nacházet. Pro získání kvalitního výsledku je třeba zadat rozměry plochy, polohu a také meteorologická data. [11]

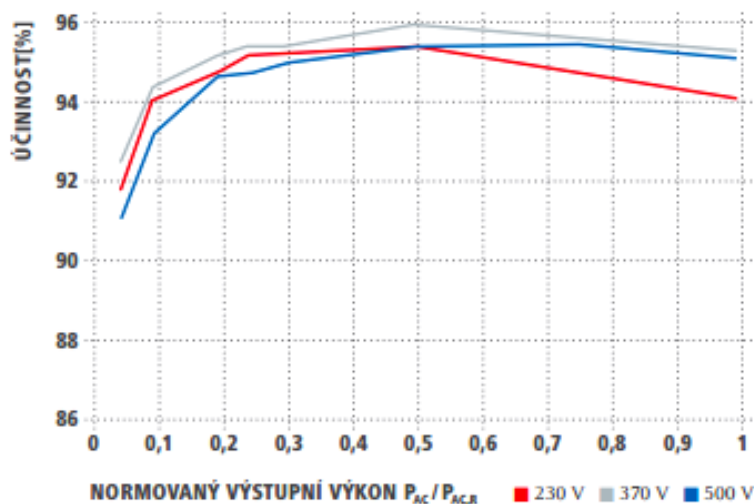
Vlastní zařízení se skládá z FV panelů, střídačů, el. ochran, kabeláže a případně transformátoru. Výkon elektrárny je závislý především na dopadajícím slunečním záření a okolní teplotě. Pro ČR se udává optimální sklon panelů 32°. Tento úhel zajišťuje maximální využití slunečního záření po celý rok (platí pro pevné uchycení panelů). Další možností je využití nákladnější otočné konstrukce, které se v ČR tolik nevyužívá kvůli nevýhodnosti. Při dimenzaci systému je třeba počítat se zvýšením proudu vyráběného panely nad hodnoty udávané výrobcem, což nastává při nízkých teplotách v zimním období. Proto je třeba s tímto jevem počítat a správně zvolit průřez vodičů a střídače. [11]

Počet střídačů je dalším důležitým bodem návrhu. Pro zařízení o výkonu 0,5 MW<sub>p</sub> máme na výběr ze dvou uspořádání, a to decentralizované střídače nebo centrální střídač spojený s trafostanicí. [11]

Výhodou **centrálního střídače** je vysoká účinnost přeměny energie (až 98%). Dále je nutné dobře zvážit rozsah vstupního napětí (při tomto napětí střídač začne dodávat energii do sítě). Tento střídač se obvykle umísťuje do středu plochy zastavěné FV panely kvůli minimalizaci odchylek, které vznikají v důsledku ztrát ve vedení vlivem jejich různých délek. Důležité je také pečlivě zajistit servisní podmínky s dodavatelem střídače, protože výpadek by způsobil ekonomické ztráty. [11]

Další možností je použití **decentralizovaných střídačů** o určitém výkonu a počtu, které se umísťují přímo k panelům. Při návrhu je důležité brát v úvahu, že provoz střídačů by neměl probíhat při jejich maximálním výkonu, maximální napětí přivedené ke střídači by nemělo přesahovat 85% jeho maximální možné hodnoty, kterou je střídač schopen zpracovat. [11] „Na **Obr. 6.1** vidíme průběh účinnosti v závislosti na normovaném výstupním výkonu při různých napětích u střídačů použitých na FV elektrárně v Troubkách o výkonu 0,5 MW<sub>p</sub>.“ [11] Vhodné je také zvolit kvalitnější střídače, které jsou vybaveny tzv. MPP trackerem, který dokáže hledat bod maximálního výkonu. Díky elektronice střídač dokáže posouvat pracovní bod střídače do optimální polohy dle vstupního napětí a proudu. Při použití decentralizovaných střídačů je třeba brát v úvahu možné přetížení, které může vzniknout při nízkých teplotách a jasné obloze. Pravidelným přetěžováním se snižuje životnost střídačů. Při případném výpadku nebo poruše napomůže použití komunikačního okruhu, přes který střídače podávají informace o aktuálním stavu, díky tomu lze poruchu snadno

a rychle lokalizovat. Pro dosažení maximální efektivity je nutné mít v záloze alespoň jeden střídač. [11]



Obr. 6.1: Křivka účinnosti pro FRONIUS IG PLUS 150 [III]

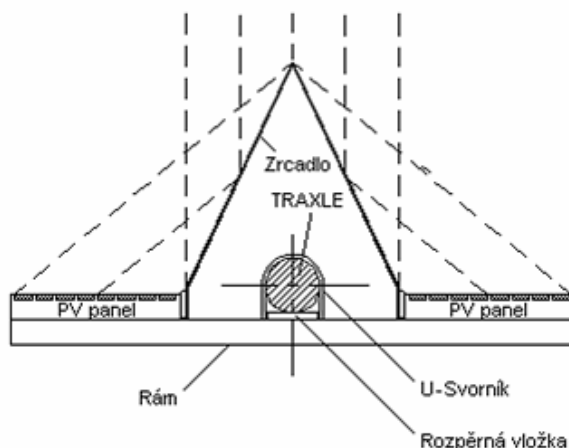
Dalším prvkem zvyšujícím efektivitu provozu je využití **monitorovacího zařízení**. Za předpokladu využití decentralizovaných střídačů je prostřednictvím tohoto zařízení možno kdykoliv kontrolovat množství vyrobeného výkonu na každém střídači, taktéž lze zjistit, zda nedochází k nežádoucím odchylkám. K tomuto se využívají senzory dopadu množství slunečního záření na jednotku plochy, senzory teploty panelů a okolí. Za pomoci těchto hodnot lze odhadnout množství vyrobené energie za určité období, toto množství energie lze porovnat s množstvím vyrobené energie získané z monitorovacího zařízení a určit odchylku. Při výskytu pravidelných odchylek je zapotřebí diagnostikovat závadu, nejčastěji použitím termokamery. Touto kamerou se odhalí vadné panely. A právě díky tomuto rychlému odhalení a vyřešení závady se snižují celkové ztráty. [11]

Pro zajištění nejvyšší efektivity provozu se doporučuje provádět kontroly alespoň jednou za 6 měsíců, vizuální kontroly alespoň jednou za měsíc. [11]

Další možností zvýšení efektivity výroby el. energie v některých oblastech solárními systémy je volba tzv. **koncentrace záření**. Koncentrátory s použitím rovinných zrcadel mohou mít buď žlabové, nebo hřebenové uspořádání. Nicméně použití **žlabových systémů** je omezené vnější teplotou prostředí, ve kterém se nachází. Vlivem intenzivnějšího působení slunečního záření dochází k nadměrnému zahřívání panelů, a tím i snižování účinnosti panelů. Kvůli vysokému koncentračnímu poměru se mohou panely přehřívat. Tento poměr může také způsobovat hnědnutí a postupný rozklad EVA fólie, což opět způsobuje snižování účinnosti panelů. Použití žlabových systémů je proto vhodné zejména v oblastech s nižší okolní teplotou a nižší intenzitou záření. [2]

Tyto nevýhody se netýkají **hřebenového systému**, jenž oplývá nižším koncentračním poměrem. Jeho uspořádáním a za pomoci tzv. *sledovače Slunce* dosáhneme homogenního

osvětlení panelů a lepšího proudění vzduchu, tudíž lepšího chlazení. Další výhodou je také to, že koncentruje i difuzní sluneční záření, nejen přímé. Na **Obr. 6.2** je vyobrazeno schéma průřezu systému s hřebenovým koncentrátorem, na kterém vidíme vrcholový úhel, který svírají zrcadla. Tento úhel je volen tak, aby záření ze zrcadel dopadalo rovnoměrně na FV panely. [2]



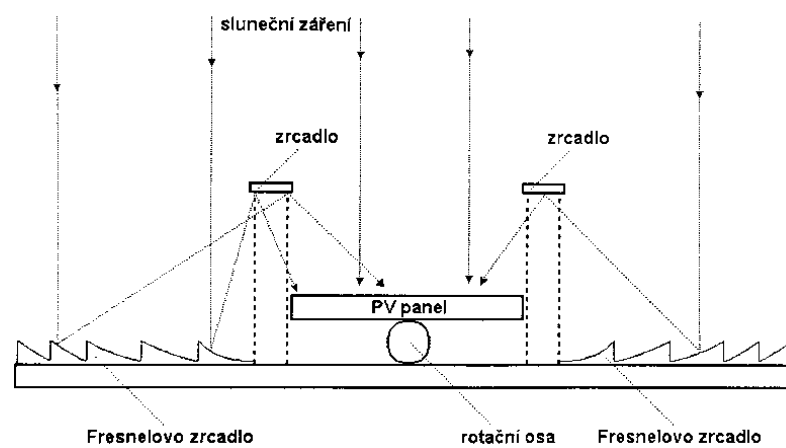
*Obr. 6.2: Schéma řezu hřebenovým koncentrátorem záření [4]*

Tento typ koncentrátoru s pohyblivým systémem může navýšit množství vyrobené energie až o 100% vůči běžně používaným panelům uchyceným na pevných stojanech. V podmínkách střední Evropy až o 50% během slunného letního období. Naopak nevýhodou tohoto systému je nutnost dlouhodobě odolávat povětrnostním vlivům. [2]

Dále je možno pro zvýšení efektivity použít **oboustranné FV panely**, které dokážou využít i světlo odražené od okolního terénu, přičemž se cenově od běžných panelů liší jen málo. Tímto získáme výkonový nárůst oproti standardním panelům v závislosti na odrazivosti povrchu až o 10-20% (při stejném nominálním výkonu a konfiguraci). Za použití pohyblivého stojanu, hřebenového koncentrátoru a oboustranných panelů pak navýšení může činit až 100% vůči pevně uchyceným, standardním panelům. [2]

Systémy s vysokou koncentrací záření s **parabolickými zrcadly** nebo s **Fresnelovými čočkami** (viz **Obr. 6.3**) jsou také vysoce efektivní, nicméně jsou pro naše podmínky nevýhodné, zejména díky schopnosti pojmout pouze přímé sluneční záření, což je nejlépe využitelné v oblastech s vysokým počtem slunečných dní v roce či vysokým poměrem přímého záření k difuznímu (tento poměr se snižuje s rostoucí vlhkostí v ovzduší). Další nevýhodou je vyžadovaná masivnost konstrukce, která vede ke zvyšování nákladů na výstavbu. Masivnost konstrukce je nutná kvůli odolávání povětrnostním vlivům a gravitačním silám, k zajištění přesnosti orientace, což tyto systémy vyžadují, aby sluneční záření skutečně dopadalo na FV panely. [2]





Obr. 6.3: Schéma FV systému s Fresnelovými zrcadly [XI]

## 7. Akumulace solární energie

Předpokládá se, že se jednou fotovoltaika stane nejvýznamnějším zdrojem elektrické energie. Nevýhodou je nerovnoměrnost slunečního svitu, kvůli tomu je zapotřebí vyrobenou energii při jejím dostatku akumulovat a využít ji při nedostatku energie, jako tomu je např. v noci. [12]

Je zde několik způsobů akumulace a lze je rozdělit dle potřeby na:

- Akumulace el. energie do kondenzátorů

Této metody se využívá spíše pouze k napájení drobných zařízení, jako jsou např. zařízení pro uchovávání paměti, které musí být trvale pod napětím. Za pomoci jeho kapacity  $C$  a napětí  $U$  lze, za pomoci následujícího vztahu, získat energii, kterou je schopen uchovat.

$$W = \frac{1}{2} \cdot C U^2 \quad (8)$$

[2]

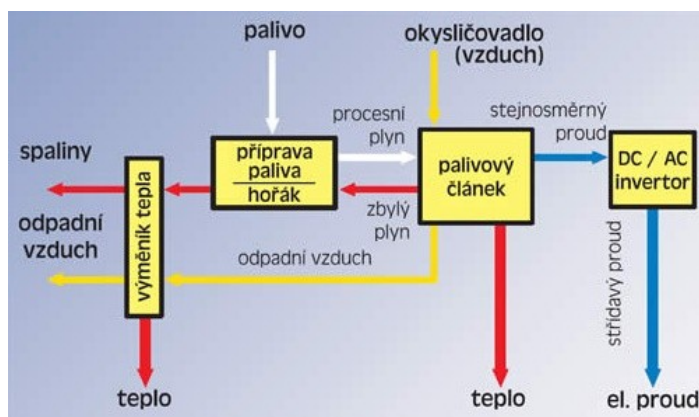
- Akumulátorové baterie

Tato forma akumulace sice nepatří k nejefektivnějším, ale je možno ji použít např. na odlehlých místech pro napájení energeticky méně náročných spotřebičů jakými jsou např. meteorologické stanice nebo osvětlení. [12] „Pro malé systémy je k akumulaci elektrické energie z FV panelů použit akumulátor dostatečné kapacity a jmenovitého napětí. Nabíjecí proces akumulátoru je řízen pomocí nabíječky, po které je požadováno, aby bylo nabíjení efektivní, aby akumulátor nebyl přebíjen a aby v případě plně nabitého akumulátoru nabíječka poskytovala režim udržovacího nabíjení. Dále je v současné době na nabíječky kladen požadavek chránit akumulátor i proti hlubokému vybití, popř. obsahovat obvody elektronické pojistky a další funkce.“ [12] Základní principy nabíjení jsou nabíjení „konstantním“ proudem, nabíjení „konstantním“ napětím nebo jejich kombinací. Termíny „konstantní“ jsou uvedeny v uvozovkách proto, že jejich hodnoty závisí na intenzitě osvětlení FV panelů. [12]

- Akumulace energie do vodíku

Vyrozenou el. energií fotovoltaickými panely se za pomoci elektrolyzy vody vyrábí vodík, který se dále využívá jako palivo, ze kterého je později možno energii opět získat. Pro výrobu 1 kg vodíku při účinnosti elektrolyzérů 90% potřebujeme cca 38 kWh a k jeho zkapalnění dalších 10 kWh. Vodík disponuje výhřevností 96 MJ/kg, což je v porovnání s černým ostravským uhlím (28 MJ/kg) více než trojnásobné. Plynný i kapalný vodík lze spalovat ve speciálních spalovacích motorech s přímým vstřikováním. [2]

Také velice perspektivní **palivové články** využívající vodík jsou schopny řízenou elektrochemickou reakcí efektivně vyrábět el. energii. Jsou to elektrochemická zařízení, která za pomoci okysličovadla přeměňují chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo na generaci elektrického proudu. Během této reakce vzniká jen malé množství tepla. Tento proces můžeme vidět na **Obr. 7.1.** [2]



*Obr. 7.1: Kogenerace s palivovým článkem [V]*

Výhodou tohoto způsobu akumulace jsou např. bezhlučnost a nulové emise. Jsou zde ale také značné nevýhody. Jednou z nich je, že vodík je prudce výbušný, čímž rostou vzhledem k bezpečnosti náklady na konstrukci. Další nevýhodou je neskladnost díky jeho nízké hustotě a váze. Dále se při konstrukci vodíkových aparatur musí používat speciální oceli, protože při úniku může vodík difundovat do kovů a tím způsobovat jejich křehnutí. [2]

- **Přečerpávací elektrárny**

Tento princip akumulace el. energie je založen na principu přečerpávání vody z jedné nádrže o určité nadmořské výšce potrubím do druhé nádrže o větší nadmořské výšce. V tomto potrubí se nachází reverzní turbína. V době přebytku čerpáme vodu z dolní do horní nádrže a naopak v době nedostatku pouštíme vodu přes turbínu zpět do dolní nádrže. Tato turbína nám za pomoci generátoru dodává el. energii. Objem nádrží, výkon turbíny a výkon generátoru se dimenzuje dle velikosti solárního systému. [2]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8. Provozní analýza FV elektrárny Troubky

### 8.1 Parametry elektrárny, informace

Tab 8.1.1

Obecné informace	
Špičkový výkon FVE (při $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )	518,4 kW <sub>p</sub>
Celková plocha FV panelů	3364,2 m <sup>2</sup>
Sklon panelů	34°
Počet kusů FV panelů	1920
Pořizovací náklady celé elektrárny	45 mil. Kč
Zahájení provozu	září 2009
Transformátor	0,4/22 kV, 630 kVa

Tab 8.1.2

Fotovoltaické panely	
Typ	SUNTECH STO 270 – 24/d
Článek	poly-crystal
Plocha článku	156 x 156 mm
Počet článků v modulu	72 v serii
Pracovní teplota	-40 °C - +85 °C
Max. proud	20 A
Max. napětí	1000 V
Max. výkon	270 W
Napětí naprázdno	44,5 V
Proud nakrátko	8,2 A
Účinnost	13,9 %

Tab 8.1.3

Střídače	
Typ	Fronius IG150 Plus
Jmenovitý výkon střídačů	12,6 kW
Rozsah napětí	130 - 500 V
Max. vstupní napětí	600 V
Max. proud	54,9 A
Jmenovitý vstupní výkon	12 kW
Výstupní napětí	230 V, 50 Hz
Účinnost střídače (euro)	95,5 %

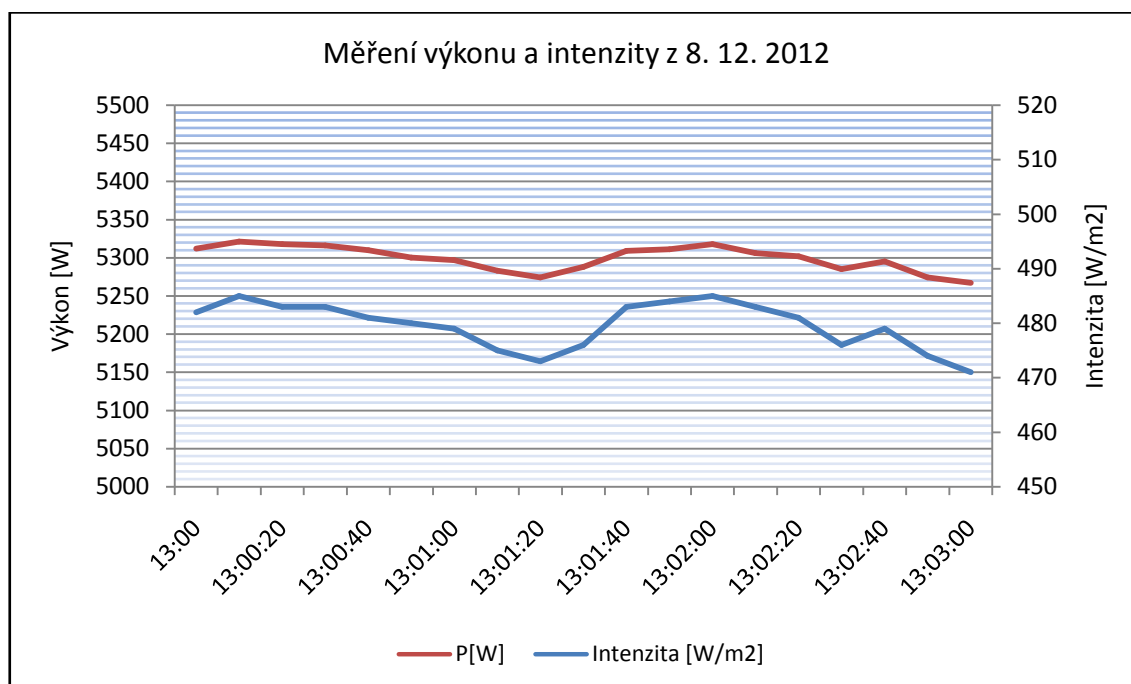
Při výstavbě FVE byla zohledňována výška spodní hrany FV panelů umístěných na konstrukcích, byla stanovena dle stoleté povodně v roce 1997. Pozemek FVE je oplocen 2 m vysokým oplocením a proti krádeži zabezpečen kamerami. Trafostanice je zděný objekt o ploše cca 40 m<sup>2</sup>. Přípojka VN je napojena kabelovým vedením (délka cca 50 m) do stávající odbočky nadzemního vedení VN 22 kV.

## 8.2 Měření účinnosti na FV elektrárně Toubky

Měření účinnosti bylo prováděno na jedné soustavě panelů o ploše 88 m<sup>2</sup>, celá elektrárna obsahuje 41 těchto soustav. Zaznamenávána byla intenzita slunečního záření [W/m<sup>2</sup>], okamžitý výkon této soustavy [W] v závislosti na čase, teplota [°C] a rychlost větru [m/s]. Intenzita slunečního záření byla odečítána pomocí měřidla *Voltcraft PL-110SM*, jehož čidlo bylo umístěno na druhé soustavě panelů o stejném sklonu, tzn. 34°. Okamžitý výkon byl odečítán ze střídače příslušného k dané soustavě. Teplota a rychlost větru byly odečítány z meteorostanice *Oregon scientific WMR200*. Měření bylo prováděno v intervalech 10 vteřin, a to minimálně ve 12 bodech. Pro následující zpracování dat bylo nutné přepočítat okamžitý výkon soustavy o 88 m<sup>2</sup> na okamžitý výkon na 1 m<sup>2</sup>. Pro následný výpočet účinnosti byl použit tento vztah:

$$\mu = \frac{P_{stř}}{I_{stř}} \cdot 100 \cdot \mu_{střídače} [\%] \quad (9)$$

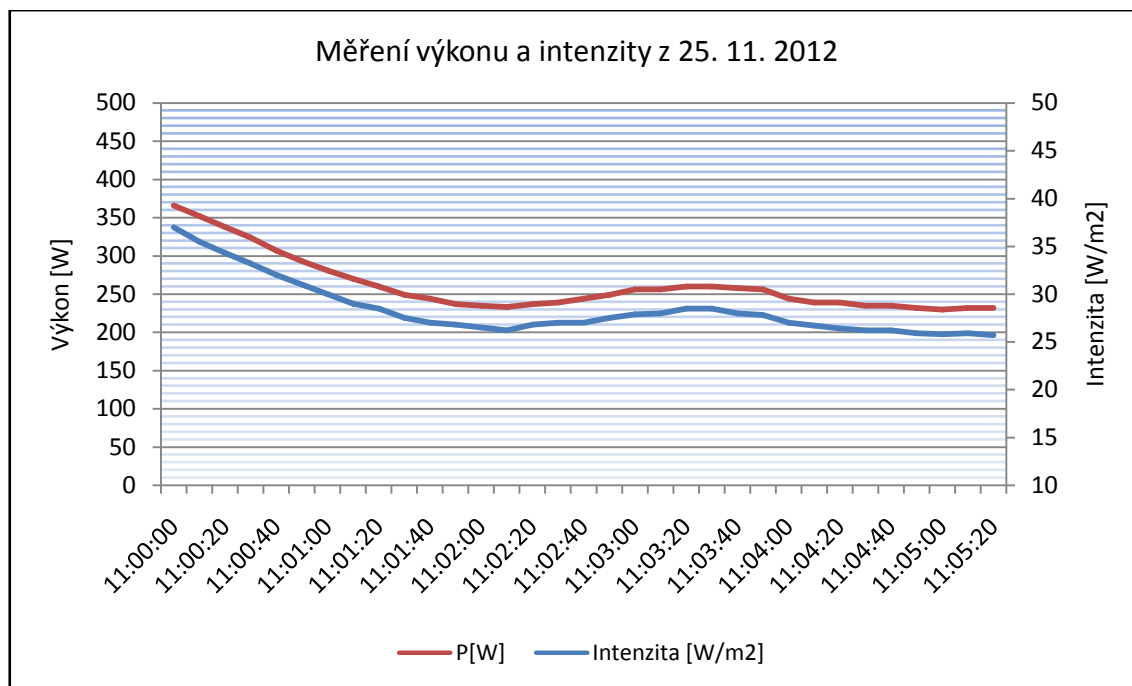
Kde  $I_{stř}$  je střední hodnota dopadajícího slunečního záření [W/m<sup>2</sup>],  $P_{stř}$  je přepočítaný střední výkon soustavy FV panelů na střídači [W] a  $\mu_{střídače}$  je účinnost střídače za daného zatížení. Ke stanovení této účinnosti byl použit graf, na němž je vyobrazen průběh účinnosti střídače v závislosti na vstupním výkonu. Tento graf můžeme vidět na **Obr 6.1**. Pro ověření správnosti měření bylo použito následující grafické srovnání křivek dvou měřených veličin.



Obr. 8.2.1: Průběh výkonu a intenzity slunečního záření

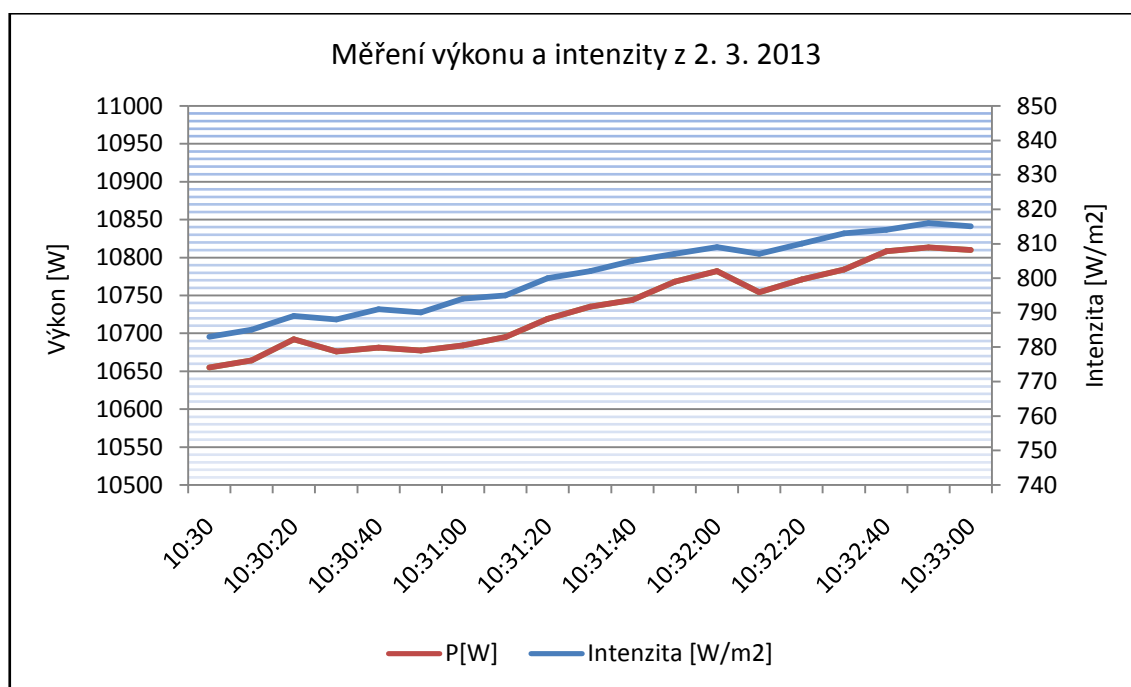
V grafu na **Obr. 8.2.1** můžeme vidět, že křivky obou veličin se při změně hodnoty slunečního záření mění současně, protože závislost výkonu a intenzity dopadajícího slunečního záření je v takto krátkém časovém intervalu a za konstantní teploty téměř přímková.

Z toho vyplývá, že měření bylo provedeno správně (bez větších odchylek). Uvedený graf odpovídá měření z 8. 12. 2012 při teplotě  $-1,5^{\circ}\text{C}$ , jasné obloze, větru nižším než  $1\text{ m/s}$ . Účinnost při těchto podmínkách dosahovala  $11,05\%$ . Těchto měření bylo provedeno pět za různého počasí a různých hodnot intenzit.



Obr. 8.2.2: *Průběh výkonu a intenzity slunečního záření*

Toto měření (na **Obr. 8.2.2**) proběhlo 25. 11. 2012 při zataženém počasí, mlze, při teplotě  $7^{\circ}\text{C}$  a při větru opět menším než  $1\text{ m/s}$ . Účinnost vyšla  $9,51\%$ .



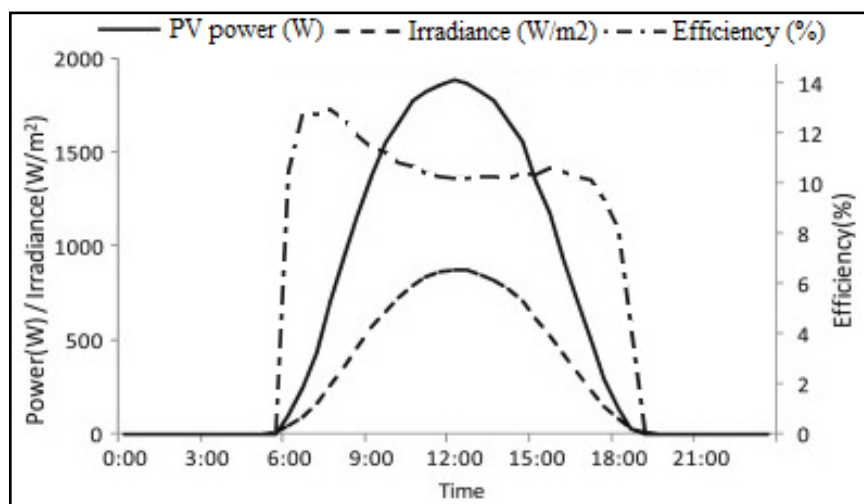
Obr. 8.2.3: Průběh výkonu a intenzity slunečního záření

Na dalším grafu (**Obr. 8.2.3**) je vyobrazeno měření z 2. 3. 2013, kdy při jasné obloze, teplotě 5,5 °C a větru o síle pohybující se okolo 6 m/s účinnost dosáhla 14,47 %.

Dále byly provedeny další dvě obdobná měření. Jedno z nich dne 3. 2. 2013 při zataženém počasí, teplotě -0,5 °C a větru menším než 1 m/s. Účinnost zde dosáhla hodnoty 12,76 %. Další měření proběhlo téhož dne o tři hodiny později, kdy se obloha rozjasnila, teplota nabyla hodnoty 1 °C a vítr se zvedl na 5 m/s. Účinnost potom vyšla 14,53 %.

Z těchto dílčích měření byl dále zpracován denní průběh účinnosti v závislosti na intenzitě záření a výkonu (uvedenými pěti měřeními byly získány hodnoty účinností při intenzitách od 30 W/m<sup>2</sup> do 800 W/m<sup>2</sup>, podobného rozsahu hodnot nabývá i hodnota intenzity během „jasného“ dne). Na **Obr. 8.2.4** vidíme, jak by měly tyto křivky za jasného počasí vypadat (střed grafu představuje sluneční poledne).





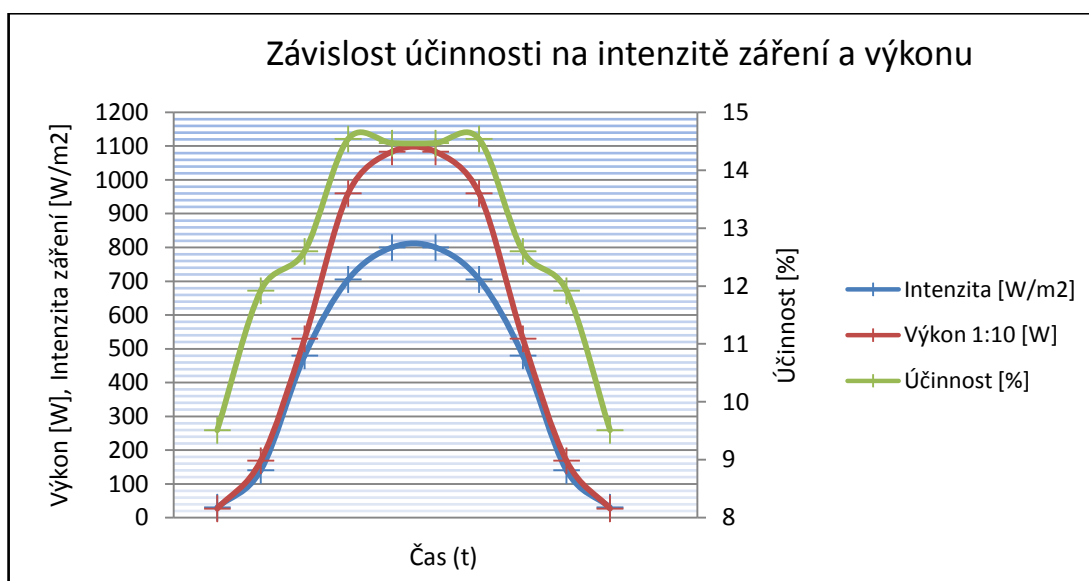
Obr. 8.2.4: Průběh účinnosti, výkonu a intenzity za jasného dne [VI]

V následující tabulce jsou shrnuty hodnoty z jednotlivých měření. Pro jasnější grafické vyobrazení byl výkon přepočten v poměru 1:10, jehož hodnoty jsou v tabulce vyobrazeny. Pro získání celého průběhu byly změřené hodnoty osově obráceny, tím byly nasimulovány osově souměrné části křivek vpravo od slunečního poledne.

Tab. 8.2.1: Dílčí hodnoty účinnosti, výkonu a intenzity slunečního záření

Intenzita [ $\text{W/m}^2$ ]	Účinnost [%]	Výkon [W]	Výkon 1:10 [W]
30	9,51	261	26,1
140	11,92	1691	169,1
480	12,6	5300	530
705	14,54	9603	960,3
800	14,47	10832	1083,2
800	14,47	10832	1083,2
705	14,54	9603	960,3
480	12,6	5300	530
140	11,92	1691	169,1
30	9,51	261	26,1

V následujícím grafu (na Obr. 8.2.5) jsou vyneseny hodnoty z Tab. 8.2.1. Z tohoto grafu můžeme vyčíst jistou shodu s grafem uvedeným na Obr. 8.2.4, bohužel není zcela jasně vidět znatelný propad účinnosti při maximální intenzitě záření, která přesahuje hodnotu  $800 \text{ W/m}^2$ , a to kvůli době měření. V grafu na Obr. 8.2.4. je evidentní, že byl sestrojován z hodnot naměřených v letních měsících a teploty panelů jistě dosahovaly vyšších hodnot, zatímco hodnoty v grafu níže pochází ze zimního období a teplota při měření za nejvyšší intenzity slunečního záření dosahovala  $5^\circ\text{C}$ , tudíž účinnost nebyla natolik ovlivněna (snížena) zvýšenou teplotou.

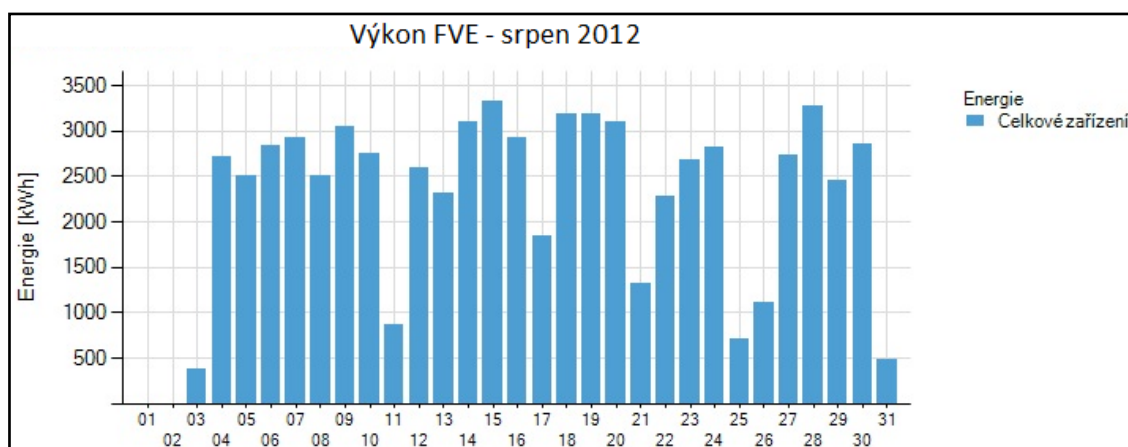


Obr. 8.2.5: Průběh výkonu a intenzity slunečního záření

### 8.3 Záznam výkonu na FV elektrárně Troubky

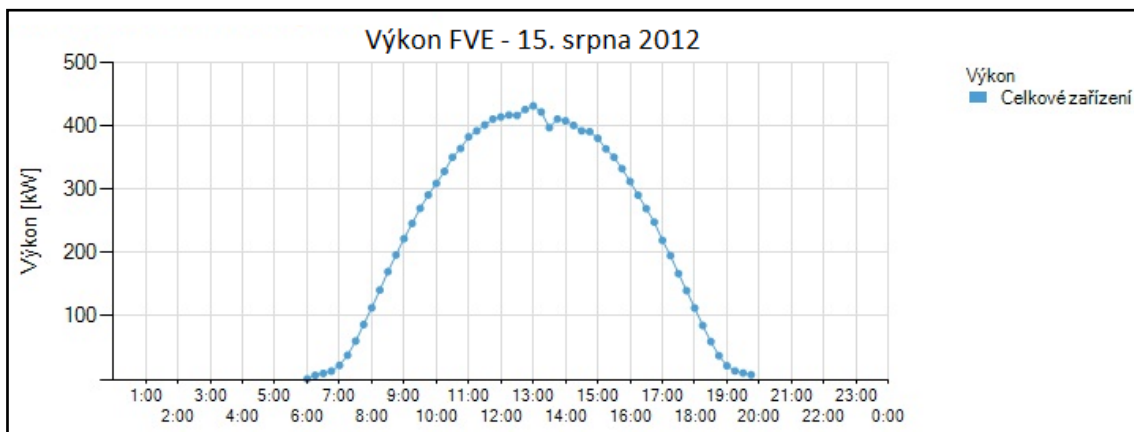
Zaznamenaná data výkonů pochází z dataloggeru systému Fronius Solar Access, jež jsou graficky vyobrazena na následujících grafech. Na některých grafech si můžeme všimnout chybějících dat, jako např. na následujícím grafu ve dnech 1. 8. 2012 a 2. 8. 2012, tento nedostatek byl způsoben nefunkčností dataloggeru.

Na prvním z grafů (na **Obr. 8.3.1**) vidíme denní hodnoty výkonů celé FVE Troubky za měsíc srpen roku 2012. V tomto měsíci byla většina dnů slunných. Hodnota nejvyššího výkonu nabyla 3300 kWh a to dne 15. 8. a nejnižší 400 kWh dne 3. 8. 2012.

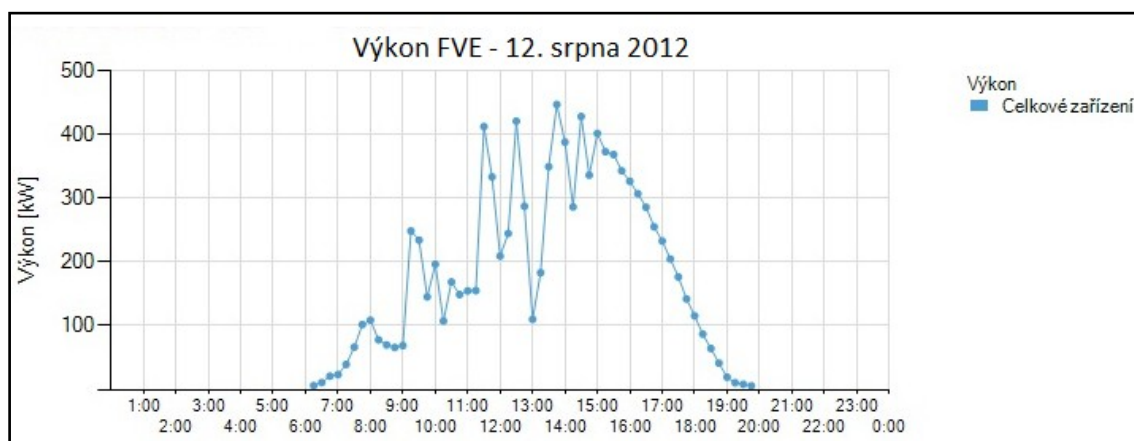


Obr. 8.3.1: Denní hodnoty výkonů v měsíci srpnu 2012

Na grafech z 15. a 12. srpna (**Obr. 8.3.2 a 8.3.3**) vidíme rozdíl průběhu výkonu za jasného a polojasného dne, jehož denní hodnota se liší o cca 1200 kWh.

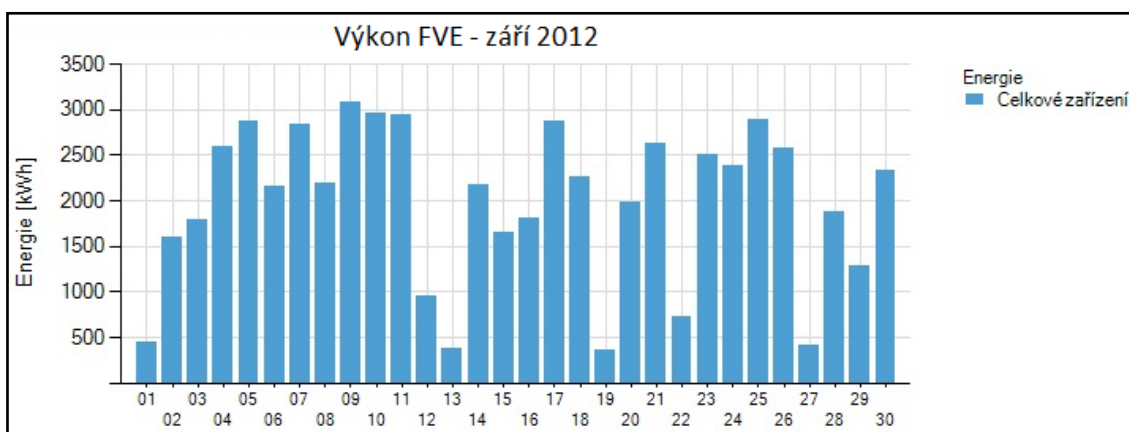


Obr. 8.3.2: Průběh výkonu za jasného letního dne

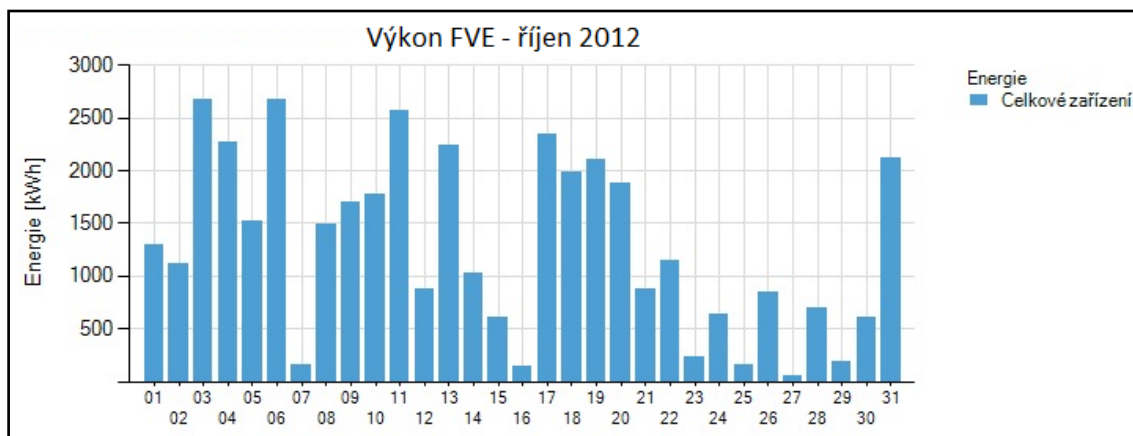


Obr. 8.3.3: Průběh výkonu za polojasného letního dne

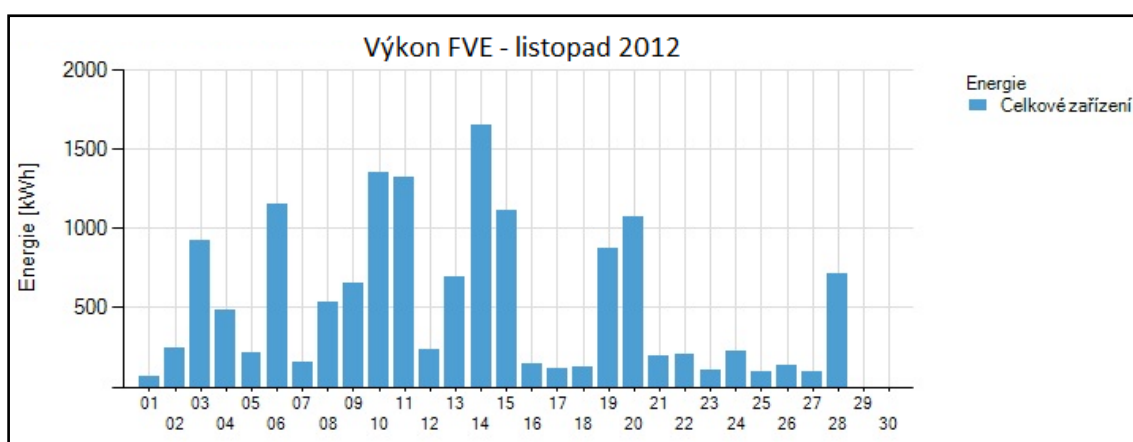
Na následujících šesti grafech jsou vyobrazeny denní hodnoty výkonů za měsíce září, říjen a listopad roku 2012 a leden, únor, březen roku 2013 (opět zde chybí vyobrazení dat z prosince 2012 a začátku ledna 2013, a to z důvodu krádeže tří střídačů a následné poruše dataloggeru). Lze pozorovat pokles slunečných dnů s příchodem zimy a taktéž výrazný pokles hodnot denních výkonů se zkracujícími se dny.



Obr. 8.3.4: Denní hodnoty výkonů v měsíci září 2012

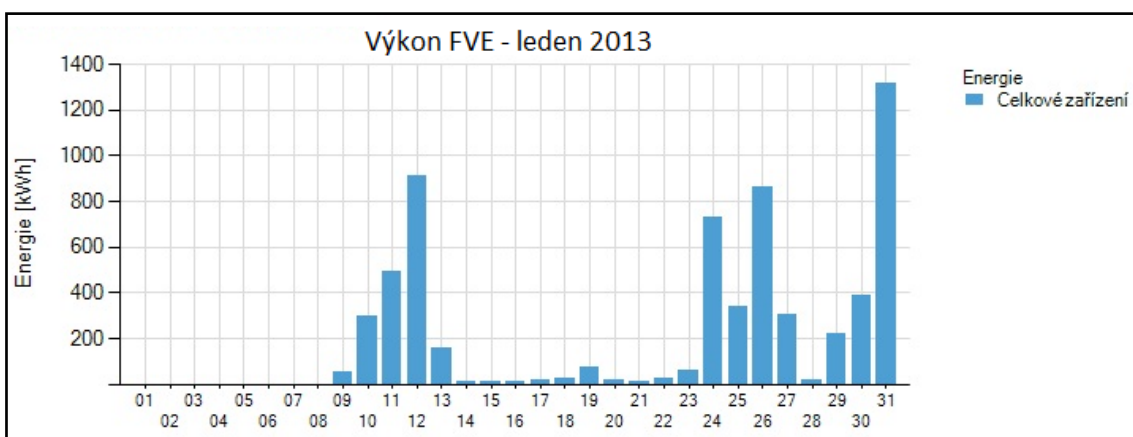


Obr. 8.3.5: Denní hodnoty výkonů v měsíci říjnu 2012

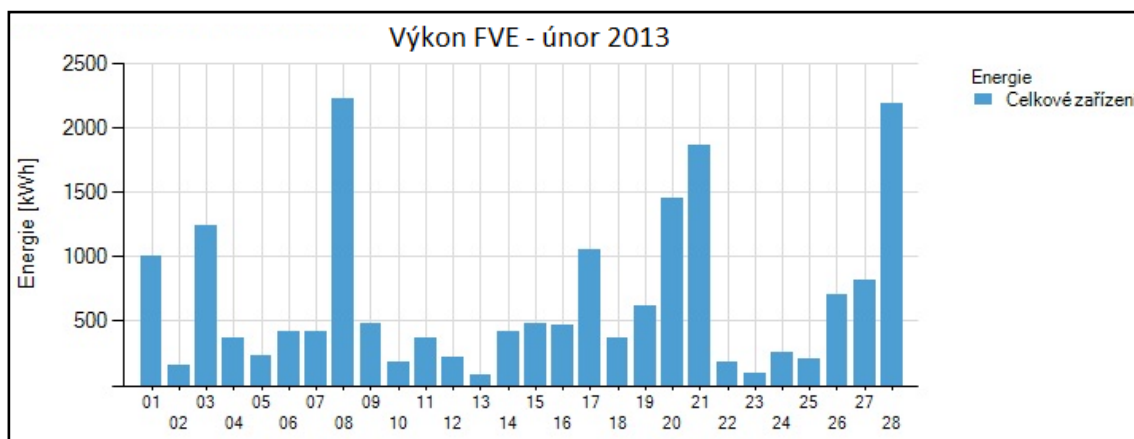


Obr. 8.3.6: Denní hodnoty výkonů v měsíci listopadu 2012

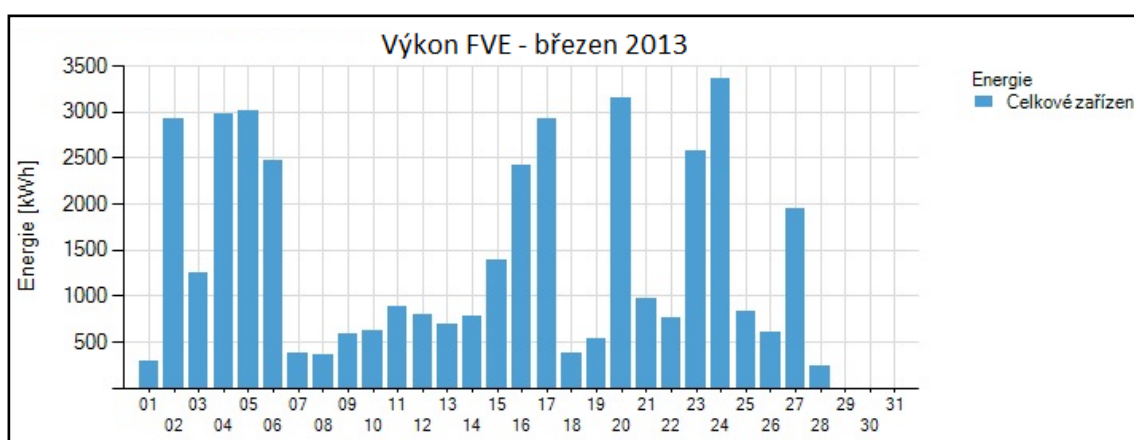
V měsíci lednu (viz **Obr. 8.3.7**) denní výkony dosahují nejnižších hodnot, a to nejen kvůli zataženému počasí, ale také napadenému sněhu, který byl z panelů odstraňován dne 23. 1. 2013. V dalším období padal sníh také, nicméně díky nastávajícím oblevám se odstraňoval samovolně.



Obr. 8.3.7: Denní hodnoty výkonů v měsíci lednu 2013



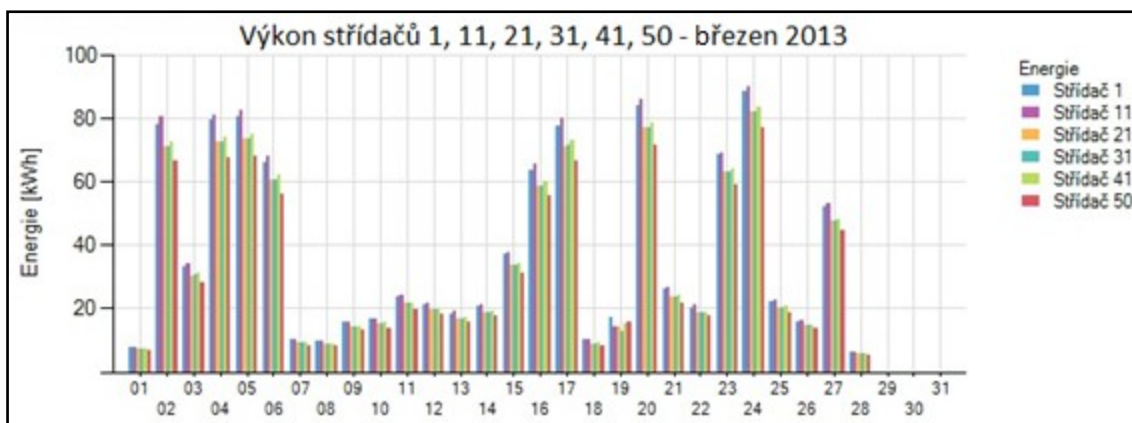
Obr. 8.3.8: Denní hodnoty výkonů v měsíci únoru 2013



Obr. 8.3.9: Denní hodnoty výkonů v měsíci březnu 2013

Na dalších grafech (např. na grafu na **Obr. 8.3.10**) jsou vyobrazeny jednotlivé hodnoty výkonů střídačů příslušných daným soustavám panelů. Vybrány byly takové soustavy, které se nacházejí v různých místech elektrárny, např. střídač č. 1 a 11 přísluší soustavám, které leží v první řadě panelů, a to na začátku a na konci řady. Střídače č. 21 a 31 se nacházejí ve druhé řadě panelů, a to na začátku a na konci, stejným způsobem byly vybrány i střídače č. 41 a 50 ležící ve třetí řadě.

V následujícím grafu (na **Obr. 8.3.10**) denních hodnot výkonů za měsíc březen lze pozorovat znatelně vyšší hodnotu denního výkonu na střídači č. 1 a 11, jež jsou znázorněny modrou a fialovou barvou. Tento jev je způsoben umístěním panelů. Zmíněné dva střídače přísluší totiž soustavám v první řadě panelů, tzn., že během dne nejsou zastíněny ostatními panely, jako je tomu např. u soustav umístěných v dalších řadách, které bývají při východu a západu slunce, byť pouze z malé části, zastíněny panely v řadě před nimi. Dalším faktorem ovlivňujícím rozložení výkonu mezi střídači může být nerovnoměrné zastínění panelů při polojasné obloze.



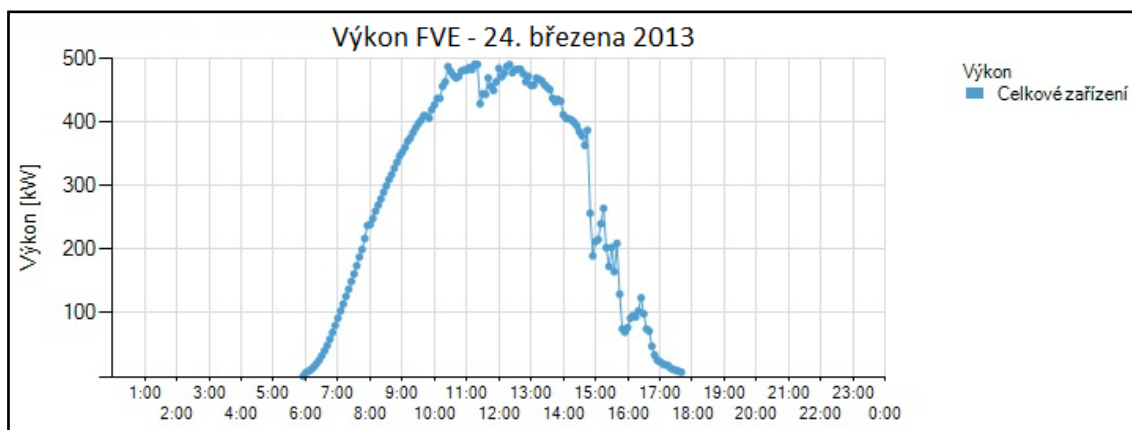
Obr. 8.3.10: Denní hodnoty výkonů na jednotlivých střídačích v měsíci březnu 2013

Na dalších třech grafech jsou znázorněny průběhy výkonu ze dne 24. března (**Obr. 8.3.11 a 8.3.12**), který byl v tomto měsíci nejvýdělečnější a dne 21. března (**Obr. 8.3.13**), který patří ke dnům s nejnižší hodnotou vyrobené energie za tento měsíc.

Na prvním z nich je vyobrazen průběh výkonu celé FVE ze dne 24. března.

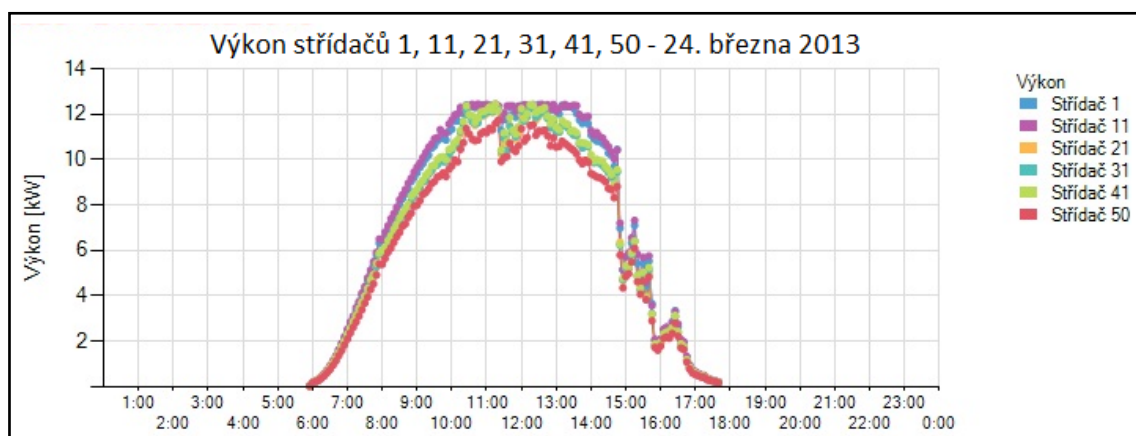
Na druhém grafu můžeme opět vidět průběh výkonu na jednotlivých střídačích, ve stejném uspořádání jako v grafu předchozím. Opět lze jasně vidět, že výkony na střídačích č. 1 a 11 převyšují výkony na střídačích umístěných v druhé a třetí radě. Naopak nejnižšího výkonu dosahovala soustava panelů příslušná střídači č. 50. Pouze během slunečního poledne se výkonům na střídačích v první radě panelů srovnaly výkony na střídačích č. 31 a 41, které se nacházejí v řadách dvě a tři.

Na třetím grafu ze dne 21. března je vyobrazen průběh výkonu za celý den na jednotlivých střídačích v daném uspořádání. Lze opět pozorovat převyšující výkon na střídači č.1 a 11 vůči ostatním střídačům.

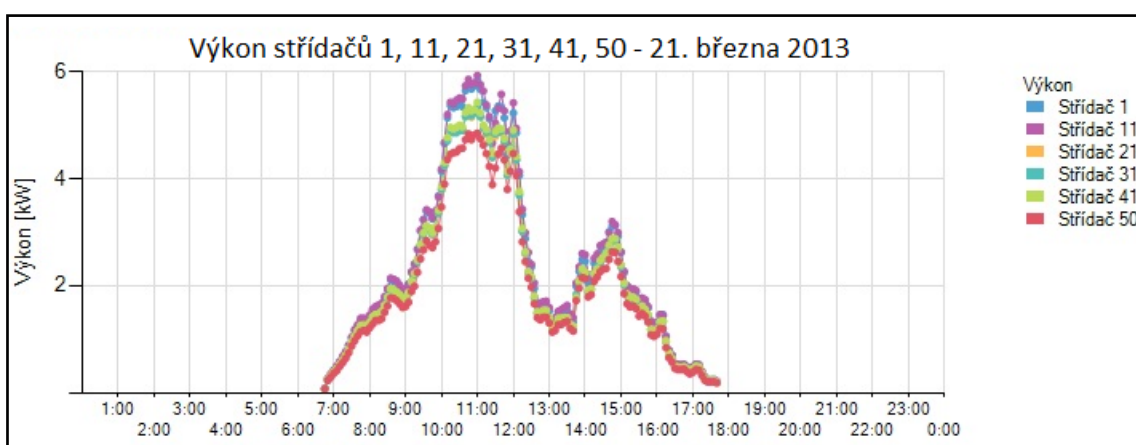


Obr. 8.3.11: Průběh výkonu celého zařízení ze dne 24. března 2013



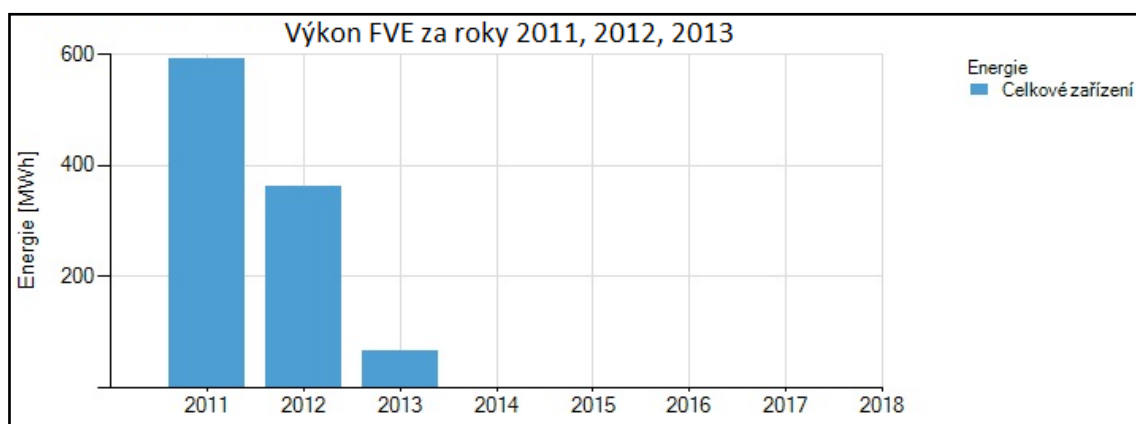


Obr. 8.3.12: Průběh výkonu na jednotlivých střídačích ze dne 24. března 2013



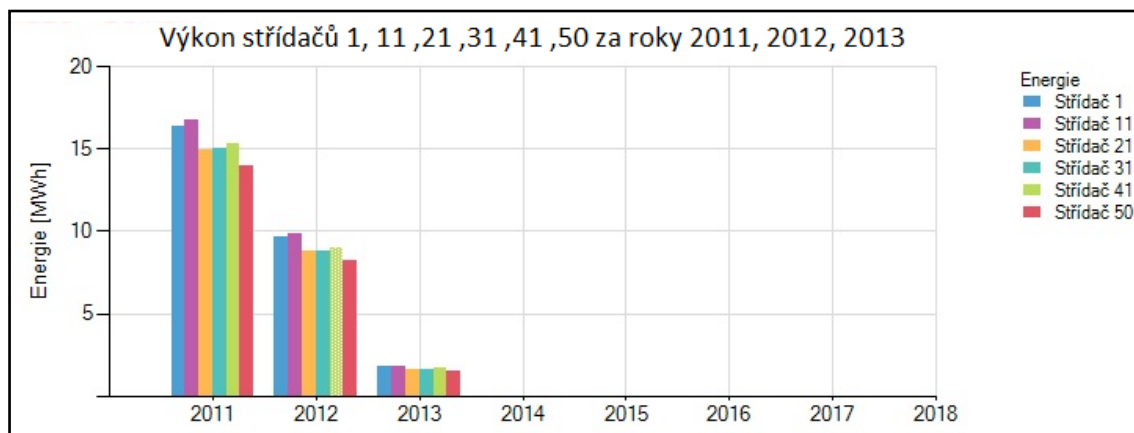
Obr. 8.3.13: Průběh výkonu na jednotlivých střídačích ze dne 21. března 2013

Na dalším grafu (viz **Obr. 8.3.14**) jsou vyobrazeny celkové výkony za roky 2011, 2012 a 2013. Tyto hodnoty odpovídají pouze zaznamenaným datům, tzn., že pro rok 2011, kdy záznam dat fungoval nepřetržitě, hodnota odpovídá reálné hodnotě, u hodnot z roku 2012 je třeba poznamenat, že v měsících květen, červen, červenec a prosinec byl nefunkční datalogger a hodnota k roku 2013 přísluší pouze prvním třem měsícům roku.



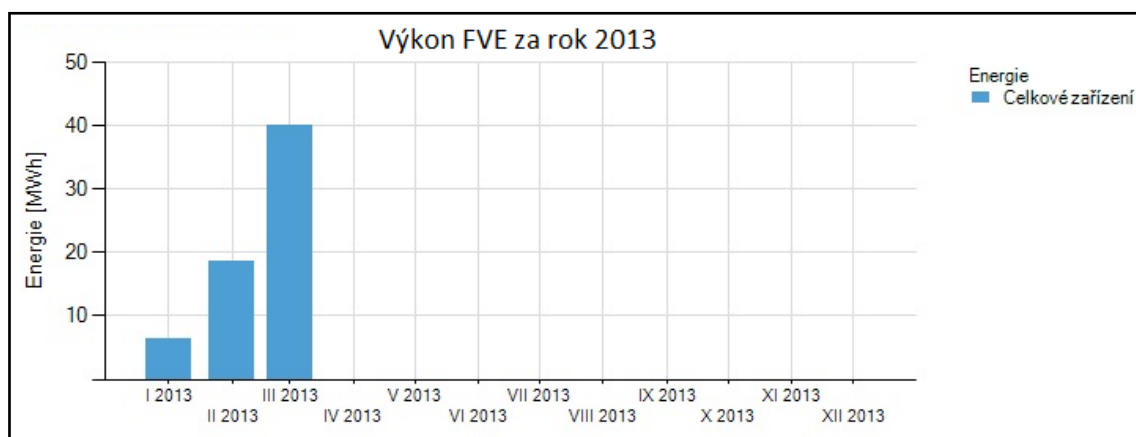
Obr. 8.3.14: Výkony celého zařízení za období leden 2011 - březen 2013

Na následujícím grafu (viz **Obr. 8.3.15**) je vyobrazeno totéž jako v předchozím s rozdílem vyobrazení výkonů na daných střídačích. Za rok 2011 střídače č. 1 a 11 vyrobily o přibližně 2 MWh více energie než střídač č. 50.



*Obr. 8.3.15: Výkony na jednotlivých střídačích za období leden 2011 - březen 2013*

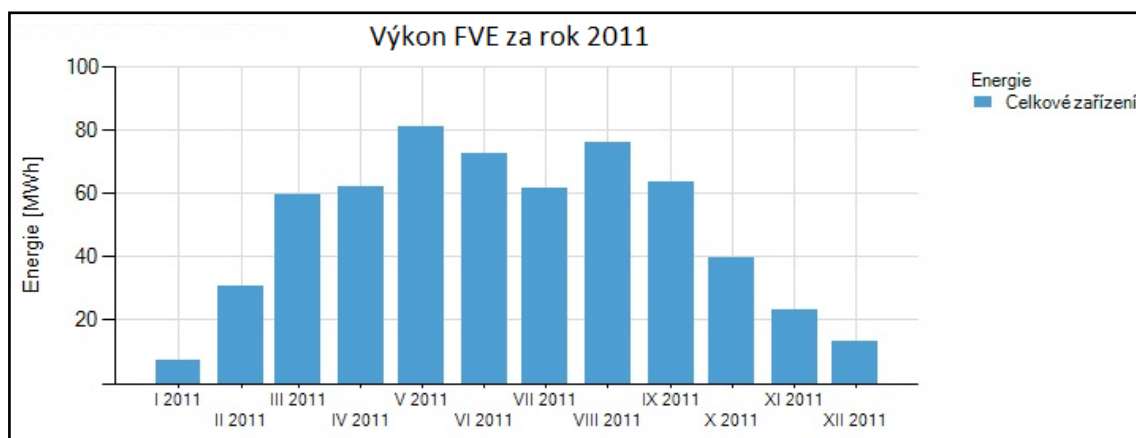
Za jednotlivé měsíce roku 2013 dle portálu CHMI.CZ [13] dosahovaly měsíční hodnoty doby trvání slunečního svitu v meteorologické stanici Olomouc pro měsíc leden 26,7 hodin, v měsíci únoru 41,5 hodiny a v měsíci březnu 101,6 hodiny. Nárůst této veličiny lze pozorovat i v postupném nárůstu výkonů na následujícím grafu na **Obr. 8.3.16**.



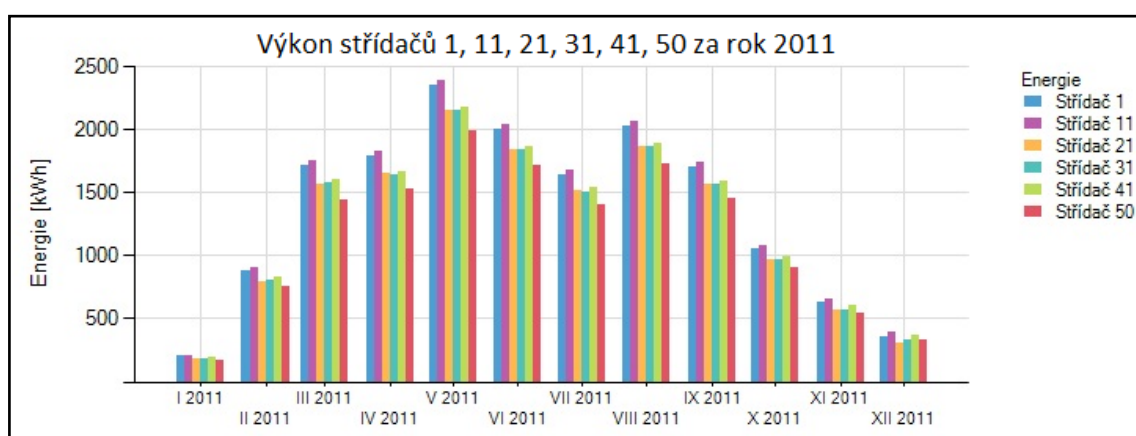
*Obr. 8.3.16: Měsíční výkony celého zařízení za první tři měsíce roku 2013*

Na posledních dvou grafech této podkapitoly (viz **Obr. 8.3.17** a **8.3.18**) jsou vyobrazeny měsíční hodnoty výkonů z roku 2011 celé FVE Troubky. Tento rok byl vybrán z důvodu, že datalogger byl funkční po celý rok, tudíž lze vyčíst přesnou hodnotu ročního výkonu, která činí necelých 598 MWh.





Obr. 8.3.17: Měsíční výkony celého zařízení za rok 2011



Obr. 8.3.18: Výkony na jednotlivých střídačích za rok 2011

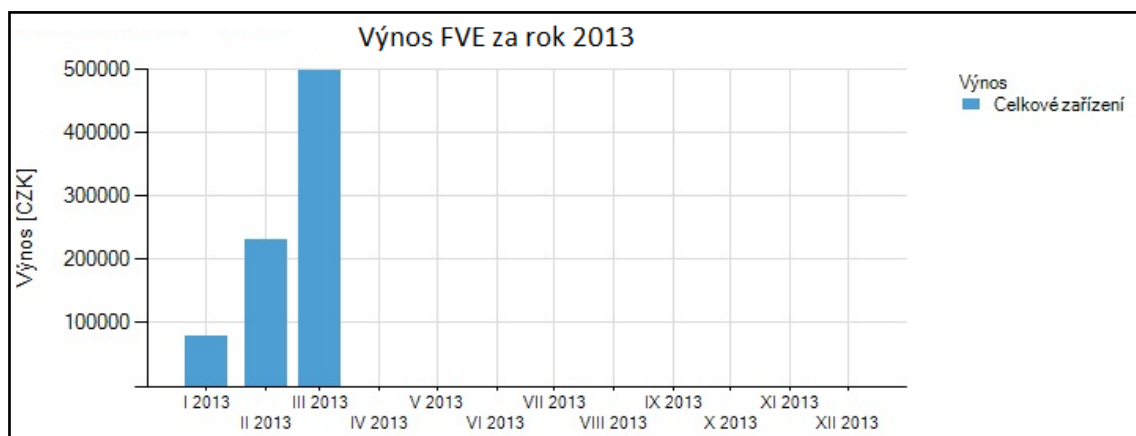
Za zaznamenávané období, tj. období, po které byl funkční datalogger počínaje lednem roku 2011 po konec března roku 2013, vyrobila FVE Troubky **1152,81 MWh**. Pro lepší představu je vhodné přepočítat toto „funkční“ období na měsíce, tj. 23 měsíců. Z uvedených dat potom na každý měsíc připadá cca 50 MWh vyrobené energie.

## 8.4 Výnos FVE Troubky

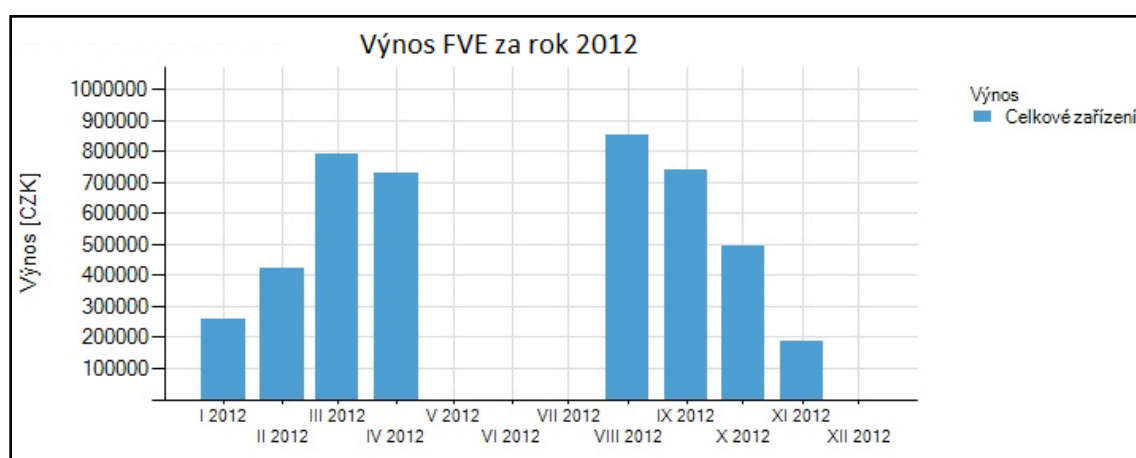
Peněžní výnos je pro provozovatele prakticky nejdůležitějším údajem. Hodnoty byly opět odečteny z dataloggeru systému Fronius Solar Access.

Na následujících třech grafech (viz **Obr. 8.4.1**, **8.4.2** a **8.4.3**) jsou vyobrazeny jednotlivé měsíční výnosy za sledované období, tzn. od začátku ledna roku 2011 po konec března roku 2013. Ze všech tří grafů lze pozorovat nárůst výnosu od měsíce ledna po březen.

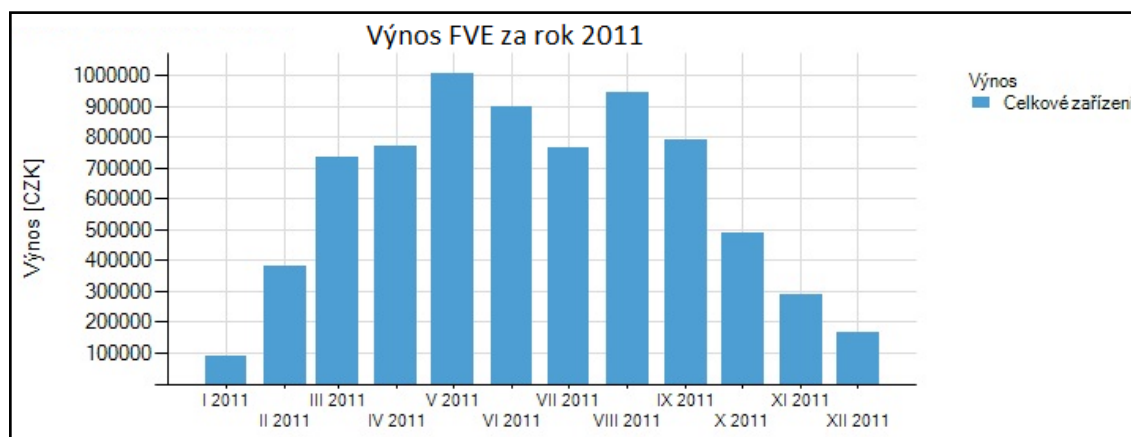
Na třetím grafu (**Obr. 8.4.3**), kde je vyobrazen výnos za celý rok 2011, nejvyšší měsíční výnos dosáhl částky 1 milion korun, a to v měsíci květnu. Nejnižšího výnosu bylo dosaženo v měsíci lednu, tato částka nepřevýšila 100 tisíc korun.



Obr. 8.4.1: Měsíční výnosy z prvních tří měsíců roku 2013

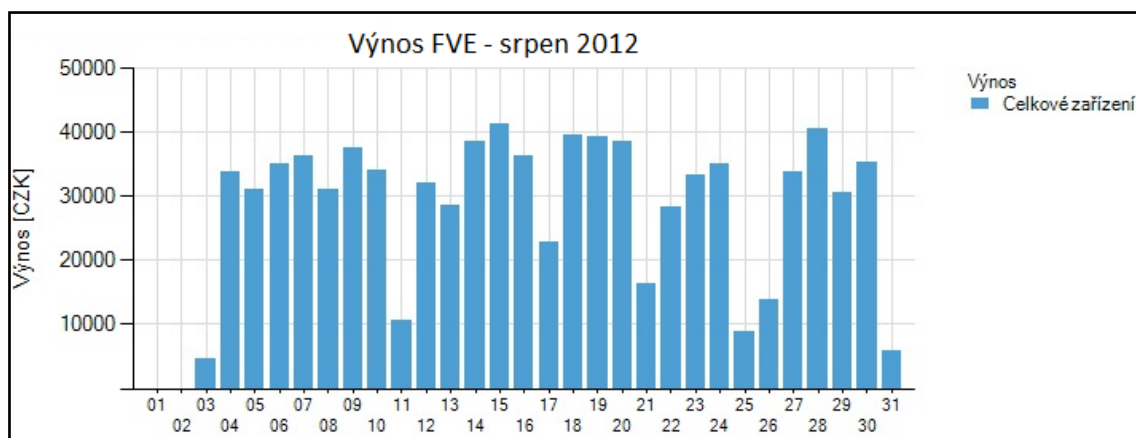


Obr. 8.4.2: Měsíční výnosy z roku 2012



Obr. 8.4.3: Měsíční výnosy z roku 2011

Na následujícím grafu (viz. **Obr. 8.4.4**) je vyobrazen měsíční výnos celého zařízení za měsíc srpen roku 2012, tj. nejvýdělečnější měsíc tohoto roku za sledované období. Denní výnosy se pohybují od pěti tisíc korun po částku převyšující 40 tisíc korun.



Obr. 8.4.4: Denní výnosy ze srpna roku 2012

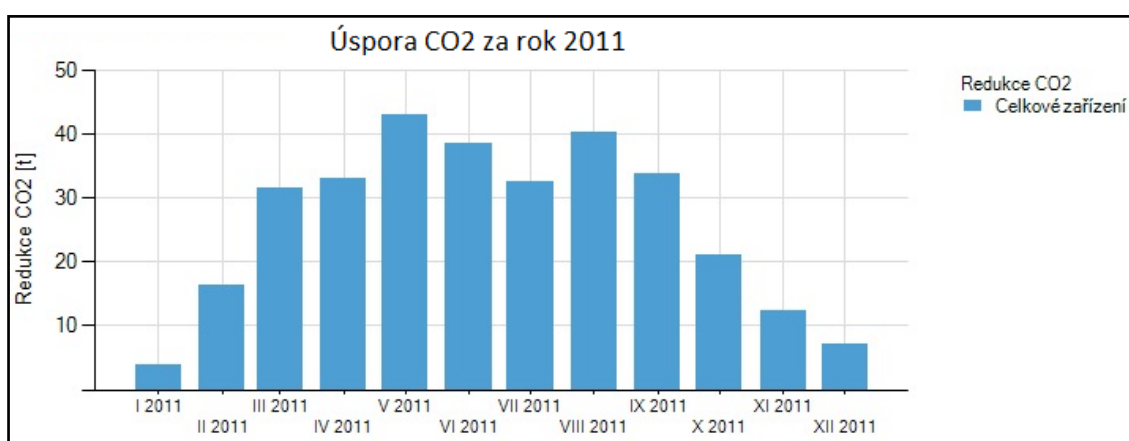
Výnos FVE za rok 2011 až 2013, tj. 23 měsíců vyobrazených v předchozích grafech činí 14 290 000 Kč. Průměrná měsíční hodnota za sledované období pak činí 620 tisíc korun.

Vezmeme-li v úvahu, že výnos elektrárny za rok 2011 činí 7,3 mil. Kč a její pořizovací náklady činili cca 45 milionů korun a budeme počítat s průměrným měsíčním výnosem 608 000 Kč (pro měsíce roku 2011), orientační návratnost této elektrárny se pak odhaduje na 74 měsíců, tzn., že ke konci roku 2015 budou zaplacený veškeré výdaje na výstavbu elektrárny.

## 8.5 Úspora CO<sub>2</sub> na FVE Troubky

Vyčíslení úspory emisí CO<sub>2</sub> je další z funkcí dataloggeru Fronius Solar Access. Tento program vyčísluje hodnotu úspor emisí CO<sub>2</sub> v závislosti na výkonu získaném z FVE na místo použití tradičních energetických zdrojů (energetický mix ČR). [14]

Na ukázkou úspor CO<sub>2</sub> solární elektrárnou Troubky byl vybrán následující graf (Obr. 8.5.1) z roku 2011. Za tento rok bylo za provozu FVE Troubky uspořeno 314 tun CO<sub>2</sub>.



Obr. 8.5.1: Měsíční úspory CO<sub>2</sub> za roku 2011

FVE Troubky za provoz od roku 2011 do března roku 2013, vyjmeme-li již zmiňované chybějící měsíce, během kterých byl nefunkční záznam dat, uspořila 610 tun CO<sub>2</sub>.

## ZÁVĚR

V teoretické části byl čtenář seznámen s problematikou fotovoltaiky, počínaje vysvětlením vyzařování sluneční energie, přes fotoelektrický jev, druhy FV panelů, zapojení FV systémů po možnosti navýšení a akumulaci energie.

Z teoretického rozboru vyplývá, že fotovoltaika má rozvoj stále před sebou a její využití není pouze v oblasti distribuce energie, ale i v mnoha dalších systémech. Účinnost FV článků se s postupným vývojem stále zvyšuje a ve snaze použití jiných materiálů než křemíku se rozšiřují možnosti využití.

V praktické části u měření účinnosti byla zvoleným způsobem ověřena účinnost soustavy FV panelů za různých povětrnostních podmínek. Hodnoty této veličiny se měnily dle teoretické předlohy. Zjišťována a ověřována byla zejména závislost účinnosti na intenzitě slunečního záření. Hodnoty účinnosti se v průměru pohybovaly kolem 12%, což za teplot, při kterých probíhalo měření, odpovídá skutečnosti, byť byla použita relativně levná a dostupná měřidla.

Původním záměrem pro vypracování praktické části této práce bylo navíc dlouhodobé zjišťování účinnosti v závislosti na intenzitě záření, teplotě panelů a získaném výkonu, tj. stejným způsobem, jak má být do budoucna učiněno napevno instalovanými měřidly. Nicméně jsem během vypracovávání práce došel k závěru, že by tento počín vedl pouze k zavádějícím výsledkům, a to kvůli nedostupnosti vhodných měřidel. K takovému měření účinnosti je třeba dlouhodobě zaznamenávat výkon před střídačem, (tím se zamezí zkreslení výsledků následkem ztrát na střídači), také dlouhodobě zaznamenávat intenzitu slunečního záření dopadající na čidlo v daném sklonu a teplotu panelů (nikoliv ovzduší). V blízké budoucnosti budou na FVE Troubky instalována právě tato měřidla a bude dlouhodobě a přesně zjišťována účinnost v závislosti na čase.

V dalších třech podkapitolách v praktické části bylo provedeno vyhodnocení výstupních výkonů za období od ledna roku 2011 do března roku 2013 (první kapitola), byl zde zmíněn vliv uspořádání panelů na výstupní výkon, který udává součet výkonů na jednotlivých střídačích. Byl tu také vyhodnocen nárůst měsíčních hodnot výkonů s nárůstem měsíčních hodnot doby trvání slunečního svitu, který byl získán z portálu CHMI.CZ. FVE Troubky vyrobila za sledované období, tj. 23 měsíců, celých 1153 MWh.

Ve druhé podkapitole praktické části byl vyhodnocen výnos FVE Troubky a následně vyhodnocena návratnost investic pro výstavbu. Bylo zjištěno, že za sledované období vydělala elektrárna přes 14 milionů korun a její návratnost činí, ač neuvěřitelných, necelých 7 let. (Tento údaj je pouze odhadnut z hodnot získaných za sledované období, je proto nutné jej brát pouze informativně).

Ve třetí a poslední podkapitole byla zjištěna celková úspora emisí CO<sub>2</sub> za sledované období, jejichž hodnota činí 610 tun.

Praktická část měření na FVE v Troubách byla pro mě velkým přínosem, a to nejen získanými zkušenostmi v oboru elektroenergetiky, ale také spoustou získaných zkušeností s provozem takového zařízení od provozovatele pana Antonína Vochty, a to jak z provozního, tak i z ekonomického hlediska.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. BARTOŠÍK, T. a kol. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011.
2. LIBRA, POULEK. *Fotovoltaika. Teorie i praxe využití solární energie*. ILSA. Praha 2009.
3. MIŠÁK. *Vybrané typy zdrojů elektrické energie*. VŠB-TU OSTRAVA. Ostrava 2010.
4. Účinnost panelů. EkoWATT [online]. 2008 [cit. 2012-12-7]. Dostupné z WWW: <<http://fotovoltaika.ekowatt.cz/ucinnost-panelu.php>>
5. Solární panely. Fotovoltaické panely [online]. [cit. 2012-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.fotovoltaicke-systemy.info/>>
6. Monokrystalický a polykrystalický fotovoltaický panel. Solartowns [online]. 2010 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.solartowns.cz/fotovoltaicke-solarni-panely.htm>>
7. Amorfní křemík - Technologie, která neprávem stojí opomenutá v koutě. Maxisun fotovoltaické systémy [online]. [cit. 2012-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.maxisun.cz/clanky/amorfni-kremik-technologie-ktera-nepravem-stoji-opomenuta-v-koute>>
8. Obnovitelné zdroje energie. Portál ZČU [online]. [cit. 2013-12-14]. Dostupné z WWW: <[https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CD8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fportal.zcu.cz%2Fwps%2FPA\\_Courseware%2FDownloadDokumentu%3Fid%3D27644&ei=y3vLUJu5M4PQtAbUwoH4AQ&usg=AFQjCNFEoIeEtEuNcs\\_p\\_uc7VnCPYkzd1Ow&sig2=7jLdrWtYrww6-Carypt-BQ&bvm=bv.1355325884.d.Yms&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CD8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fportal.zcu.cz%2Fwps%2FPA_Courseware%2FDownloadDokumentu%3Fid%3D27644&ei=y3vLUJu5M4PQtAbUwoH4AQ&usg=AFQjCNFEoIeEtEuNcs_p_uc7VnCPYkzd1Ow&sig2=7jLdrWtYrww6-Carypt-BQ&bvm=bv.1355325884.d.Yms&cad=rja)>
9. VANĚČEK, M. FEJFAR, A. Fotovoltaika – jaká je nejlepší dostupná technologie. TZB-info [online]. 2010 [cit. 2013-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>>
10. BENDA, V. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. TZB-info [online]. 2006 [cit. 2013-12-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>
11. DOLENSKÝ, J. Zvyšování efektivnosti provozu fotovoltaických elektráren. TZB-info [online]. 2012 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8344-zvysovani-efektivnosti-provozu-fotovoltaickych-elektraren-teorie-vs-praxe>>
12. MAREŠ, J., LIBRA, M. Akumulace energie v solárních fotovoltaických systémech. ELEKTRO [online]. 2013 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=27050](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27050)>
13. Měsíční přehledy pozorování. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z WWW: <[http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_9\\_Mesicni\\_data&nc=1&portal\\_lang=cs#PP\\_Mesicni\\_data](http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_9_Mesicni_data&nc=1&portal_lang=cs#PP_Mesicni_data)>
14. STANĚK, K. Dílčí výzkumná zpráva FV systém. ČVUT [online]. 2007 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z WWW: <[http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Zpravy/FSvFVstudie\\_ekon\\_energ.pdf](http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Zpravy/FSvFVstudie_ekon_energ.pdf)>

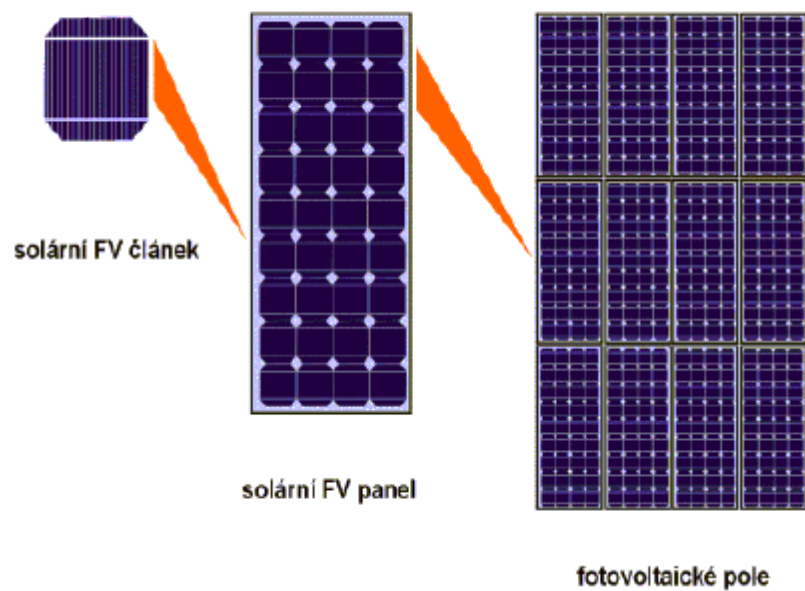
## SEZNAM OBRÁZKŮ

- I. Fotovoltaické systémy – základní informace. TermoWatt [online]. [cit. 2013-02-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.termowatt.cz/fotovoltaiicke-elektrarny/zakladni-informace.aspx>>
- II. Ostrovní systémy. Solarenavi [online]. 2013 [cit. 2013-02-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid-ostrovní-system/>>
- III. Transformátorové střídače Fronius IG plus. Fronius [online]. 2011 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z WWW: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-4CFD9512-62797CB4/fronius\\_ceska\\_republika/Fronius\\_IG\\_Plus\\_CS\\_157015\\_snapshot.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-4CFD9512-62797CB4/fronius_ceska_republika/Fronius_IG_Plus_CS_157015_snapshot.pdf)>
- IV. LIBRA, M., POULEK, V. Vysoce účinné fotovoltaické systémy s trackery a koncentrátory záření. TZB-info[online]. 2006 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3542-vysoce-ucinne-fotovoltaiicke-systemy-s-trackery-a-koncentratory-zareni>>
- V. Kogenerace. EkoWatt [online]. 2008 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml>>
- VI. AL-HAMMADI, E. a kol. Photovoltaic-grid connection in the UAE: Technical perspective. Renewable energy [online]. 2013 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811200081X>>
- VII. BARTOŠÍK, T. a kol. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2011.
- VIII. Účinnost panelů. EkoWATT [online]. 2008 [cit. 2012-12-7]. Dostupné z WWW: <<http://fotovoltaiika.ekowatt.cz/ucinnost-panelu.php>>
- IX. BENDA, V. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. TZB-info [online]. 2006 [cit. 2013-12-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiiky>>
- X. MIŠÁK. *Vybrané typy zdrojů elektrické energie*. VŠB-TU OSTRAVA. Ostrava 2010.
- XI. LIBRA, POULEK. *Fotovoltaiika. Teorie i praxe využití solární energie*. ILSA. Praha 2009.



## SEZNAM PŘÍLOH

1. Rozlišení solárního článku, solárního panelu a fotovoltaického pole [3]



2. Pohled na první řadu soustav FV polí na FVE v Troubkách



3. Pohled na řadu druhou při nízké poloze slunce a částečným zastíněním panelů



4. Fotografie střídače č. 1





5. Fotografie trafostanice s umístěním čidel meteostanice na tyči nad střechou



6. Fotografie probíhajícího měření intenzity slunečního záření s umístěným čidlem na FV panelu měřidlem Voltcraft

